

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra tváření materiálu

**Analýza chování povrchových trhlin při válcování za  
tepla**

**Analysys of surface cracks behavior during hot rolling**

Student: Marek Beňo

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Richard Fabík, Ph.D.

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství  
Katedra tváření materiálů

## Zadání bakalářské práce

Student: **Marek Beňo**  
Studijní program: B2109 Metalurgické inženýrství  
Studijní obor: 2109R034 Technologie tváření a úpravy materiálu  
Téma: **Analýza chování povrchových trhlin při válcování za tepla**  
**Analysis of surface cracks behavior during hot rolling**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teorie válcování (povrchové vady)
3. Návrh experimentu a cíle práce
4. Popis experimentu
5. Analýza výsledků
6. Diskuse a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ŽÍDEK, M., KUŘE, F. *Válcování*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1983, 1. vydání.  
[2] MURSKI, C., O'DONNELL, R. *Wady wyrobów walcowanych*. Wydawnictwo Górnictwo-Hutnicze, Stalinogród 1955.  
[3] GINZBURG, V. B. *Steel-rolling technology : theory and practice*. New York : Marcel Dekker, 1989. ISBN 0-8247-8124-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Richard Fabík, Ph.D.**

Konzultant bakalářské práce: Ing. Kamil Drozd

Datum zadání: 30.11.2009

Datum odevzdání: 29.04.2011

prof. Ing. Jiří Kliber, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.  
děkan fakulty

# Zásady pro vypracování bakalářské práce

## I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

### Uspořádání bakalářské práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list + zásady pro vypracování BP  | 5. Textová část BP           |
| 2. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 6. Seznam použité literatury |
| 3. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 7. Přílohy                   |
| 4. Obsah BP                                  |                              |

ad 1) Titulním listem je originál zadání BP, který student obdrží na své oborové katedře. Za titulním listem následují tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“.

ad 2) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (student jej obdrží na své oborové katedře) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. *V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.*

ad 3) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 4) Obsah BP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 5)

Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 7).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U

vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 6) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 7) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra .....*

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

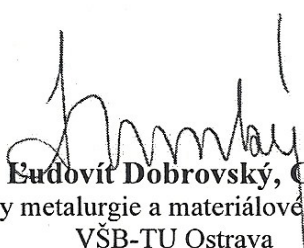
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON včetně abstraktu a klíčových slov v češtině a angličtině.

### IV.

Bakalářská práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2009/2010.

Ostrava 30. 11. 2009

  
**Prof. Ing. Eudovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.**  
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB - TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.
- Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně.

V Ostravě... 29.4.2011...

..... Marek Běho .....  
jméno a příjmení studenta

J. MATUŠKA 11/26 Ostrava - Olomouc  
adresa trvalého pobytu studenta

## **Poděkování**

Děkuji tímto vedoucímu své práce Ing. Richardu Fabíkovi, Ph.D. za pomoc s experimentem a za cenné rady a připomínky při zpracování tématu.

## ABSTRAKT BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beňo, M. *Analýza chování povrchových trhlin při válcování za tepla : bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra tváření materiálu, 2010, 56 s. Vedoucí práce: Fabík, R.

Bakalářská práce se zabývá analýzou chování povrchových trhlin při válcování za tepla. Základním pilířem této práce je pokus nasimulovat vady kontilitých bram v laboratorních podmínkách s následnou analýzou během válcování. Vady na kontilitých bramách vznikají přesto, že jsou používány nejrůznější metody pro jejich omezení, a proto se budu o tyto vady zajímat v této práci. Do materiálu byly vytvořeny podélné a příčné vady, které jsme následně válovali za tepla. Ze vzniklých výsledků jsem vytvořil grafy v programu Microsoft Office Excel. Hodnoty jednotlivých trhlin, které jsem použil do grafu, jsem navzájem porovnával. Zohlednil jsem tvar a úhel trhliny na jednotlivých vzorcích. Dále jsem porovnával geometrický tvar a výsledky uvedl v závěru práce.

Klíčová slova: Podélná trhlina, příčná trhlina, ocelová brama, válcování za tepla.

Beňo, M. *Analysis of surface cracks behaviour during hot rolling : a bachelor thesis.* Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Metallurgy and Materials Engineering Department of Forming Technologies and Material Treatment, 2010, 56 p. Supervisor: Fabík, R.

The bachelor's thesis deals with the analysis of surface crack behaviour during hot rolling. The basis of this thesis was to minimize the adverse effects of surface cracks and attempt to design a suitable technique for rolling these surface defects. This concerns defects on continuous slabs. These defects appear despite the use of various methods for their limitation, and I will therefore deal with these defects in this thesis. Longitudinal and transverse defects were created in the material, which were then hot-rolled. Microsoft Office Excel graphs were then created from the obtained results. I compared the values of separate cracks used in the graph. I took into account the shape and angle of the crack on separate samples. I then compared the geometrical shape of cracks with the simulation and included the results in the conclusion of the thesis.

Keywords: longitudinal crack, transverse crack, steel slab, hot rolling.



## Obsah

1.	Úvod .....	8
2.	Rozdělení výchozích materiálů .....	9
2.1	Plynule lité předlitky (kontilití) .....	9
2.2	Odstředivě lité předlitky .....	9
2.3	Tlakově lité bramy .....	10
2.4	Ingoty .....	10
3.	Zařízení pro plynulé odlévání bram .....	11
4.	Pnutí v odlitcích a kontilitých bramách .....	13
4.1	Napětí v předlitcích .....	13
4.2	Pnutí v předlitcích v závislosti na teplotě .....	13
5.	Krystalizátor .....	14
6.	Vady plynule litých předlitků .....	16
6.1	Povrchové vady plynule litých předlitků .....	16
6.2	Vnitřní vady .....	17
7.	Vady ingotů .....	18
7.1	Povrchové vady .....	18
7.2	Vady vnitřní .....	19
7.2.2	<i>Staženiny (lunkry)</i> .....	19
7.2.3	<i>Plynové bubliny</i> .....	19
7.2.4	<i>Likvace</i> .....	20
7.2.5	<i>Nekovové vměstky</i> .....	20
7.2.6	<i>Vnitřní trhliny</i> .....	20
8.	Vady válcovenského původu .....	21
9.	Rozdělení předvalků a jejich zpracovávání .....	21
9.1	Bloková .....	22
9.2	Slabing .....	22
9.3	Sochorové tratě .....	22
10.	Válcování plochých vývalků .....	23
10.1	Tlusté plechy .....	23
10.2	Pásky válcované za tepla .....	23
10.3	Steckelova trať .....	24
10.4	Stroje na úpravu válcovaného materiálu .....	24
11.	Matematické modelování podélných a příčných trhlin .....	25
11.1	Prvková síť simulačních modelů .....	25
11.2	Nastavení simulace .....	26
11.3	Parametry simulace .....	27
11.4	Geometrie chování trhlin během úběru válců .....	27
11.4.1	<i>Chování modelu podélné trhliny během válcování</i> .....	27
11.4.2	<i>Chování modelu příčné trhliny během válcování</i> .....	28
11.5	Způsoby uzavírání trhliny během válcování .....	29
11.6	Výsledky simulace podélné trhliny .....	29
11.7	Výsledky simulace příčné trhliny .....	29



11.8	Zhodnocení výsledků matematického modelování.....	31
12.	Návrh experimentu a cíle práce .....	31
12.1	Popis experimentu .....	32
12.1.1	Válcovací postup.....	32
12.1.2	Použité parametry.....	33
12.1.3	Měření .....	33
12.2	Způsob posouzení trhlin .....	34
12.2.1	Měření vzorků.....	34
12.2.2	Měření výšky vzorků .....	35
12.2.3	Měření trhlin.....	36
12.2.4	Směr válcování trhlin.....	37
12.2.5	Měření úhlu trhliny.....	37
13.	Analýza výsledků .....	37
13.1	Tabulky naměřených hodnot .....	38
13.1.1	Tabulky podélných trhlin .....	38
13.1.2	Tabulky příčných trhlin.....	40
13.2	Grafické posouzení .....	41
13.2.1	Grafické posouzení podélné trhliny .....	42
13.2.2	Grafické posouzení příčné trhliny.....	43
13.3	Grafy závislosti výšky, šířky a obsahu na deformaci .....	44
13.3.1	Grafy – podélné trhliny.....	44
13.3.2	Grafy – příčné trhliny .....	46
14.	Diskuze .....	47
14.1	Praktické problémy .....	48
14.2	Chování trhlin .....	48
14.3	Podélné trhliny .....	49
14.4	Příčné trhliny .....	49
14.5	Technologie válcování.....	50
14.6	Porovnání s matematickými modely.....	50
15.	Závěr.....	51
	Seznam použité literatury: .....	53
	Přílohy .....	55

## 1. Úvod

Ocel je druh materiálu, se kterým se setkáváme běžně v životě. Jedná se o slitinu železa, uhlíku a dalších legujících prvků. Její výhodou je možnost recyklace a zpětné použití ve výrobním procesu. Ve světě se vyrobí jedna miliarda tři sta milionů tun oceli ročně. Z toho šest milionů dvě stě tisíc tun v České republice. Ocel se zpracovává odléváním polotovaru nebo plynulým litím předlitků (kontislitků). Výroba oceli litím do kokil je zastaralá a už se téměř neužívá. Naopak kontilití, tzn. moderní zpracování oceli, je užíváno v 97 procentech. Z toho vyplývá, že zastaralé lití bylo téměř odstraněno a nahrazeno novým plynulým litím předlitků. Tento způsob má řadu výhod. Jedná se o zefektivnění pracovních postupů, úsporu energie, příznivý ekologický dopad, zvýšení jakosti ocelových Bram. Objevují se zde i nevýhody, a to vady kontilitých Bram. Tyto vady vznikají přesto, že jsou používány nejrůznější metody pro jejich omezení. Vznikají z důvodu nerovnoměrného ochlazování po celém průřezu a následkem termomechanického vnitřního pnutí. Jedná se o patologický jev. Hlavním předpokladem kvalitního výrobku je správná funkce krystalizátoru, ale i tak nemůžeme vzniku trhlin a jiným vadám zabránit. Vznikají tyto druhy vad: vnitřní i vnější trhliny, nerovnoměrné chemické složení, podélné rýhy v lici kůře, nadměrné oscilační vrásky. Cílem této práce je zkoumat vady a jejich chování při dalším zpracování válcováním za tepla.

Ve své práci se budu zabývat především vnějšími vadami, a to podélnými a příčnými trhlinami, které mají největší negativní dopad na další zpracování ocelového kontislitku (Bramy) při válcování ploché oceli. Vycházím z přesvědčení, že negativní dopad, který tyto vady způsobuje, by se dal omezit nebo by se mu dalo zcela zabránit vhodným technologickým postupem při válcování za tepla. Experiment bude proveden na plochých vzorcích, ve kterých budou uměle vytvořeny příčné a podélné trhliny. Tyto vzorky budou válcovány za tepla na válcovací stolici kvarto. Válcování bude probíhat v jednom směru a po každém úběru válců se tyto vzorky rozřežou. Nakonec se zkontroluje a zhodnotí, jak se trhlina v závislosti na úběru válců chová.

## 2. Rozdělení výchozích materiálů

### 2.1 Plynule lité předlitky (kontilití)

Výchozím materiálem ve válcovnách jsou plynule lité polotovary, odstředivě lité předlitky, tlakově lité bramy a ingoty. Na obr. 1 je zachycena kontilitá brama ve fázi kontilití. Metoda kontilití se používá pro odlévání bram, válcování tlustých plechů a širokých pásů, ale i pro odlévání bloků a sochorů, pro válcování bezešvých trub. V dnešní době se používá kontilití v 97% vyrobené oceli, což svědčí o značném rozmachu této technologie. Mezi výhody plynule litých předlitků patří úspora energie, příznivý ekologický dopad, zvýšení jakosti ocelových bram. [1] Podrobněji se budeme věnovat kontilití v kapitole 2.



*Obr. 1 Kontilitá brama [14]*

### 2.2 Odstředivě lité předlitky

Používají se jako výchozí materiály pro válcování bezešvých trub z legovaných ocelí se ztíženou tvářitelností, které je nutno jinak válcovat z předvrtaných sochorů. Kromě úspory kovu mají odstředivě lité duté odlitky ještě další výhody. Jejich makrostruktura je poměrně dobrá, poněvadž odstředivou silou dochází při tuhnutí k odmišení strusky a nečistot jako specificky lehčích složek na vnitřním povrchu odlitku. Rychlé tuhnutí zabraňuje vzniku hrubé dendritické struktury. Tuhnutí pod tlakem odstředivé síly podporuje zlepšenou makrostrukturu odlitku bez bublin a ředin. Homogenizačním žíháním je možno u některých druhů oceli dosáhnout částečného zrovnomnění strukturní a chemické nehomogenity. [1]

## 2.3 Tlakově lité bramy

Tento způsob se používá hlavně pro legované, většinou nerezavějící oceli. Lití nerezavějících ocelí do grafitových kokil pod tlakem umožňuje podstatné zvýšení výtěžku a zlepšení jakosti povrchu. Tlakově lité bramy se takto odlévají do šířky 1 060 mm a tloušťky cca 180 mm pro válcování širokých pásů. [1]

## 2.4 Ingoty

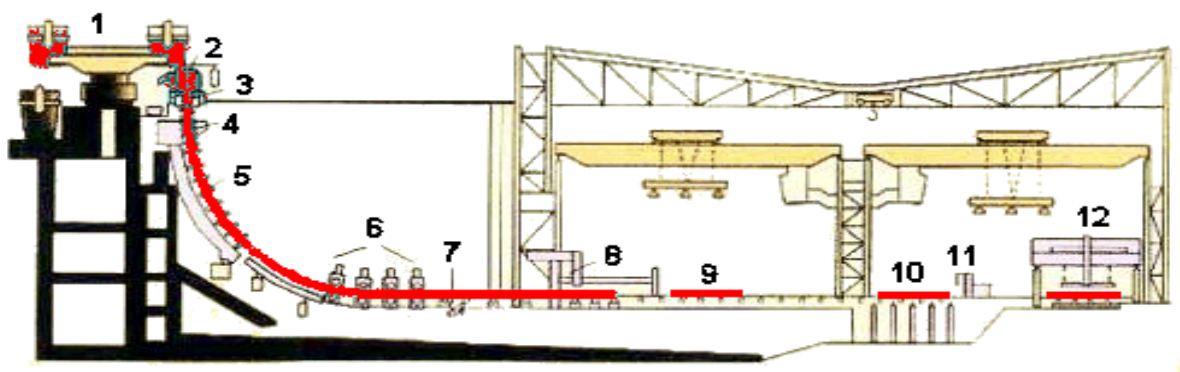
Na obr. 2 lze vidět chladnoucí ingot. Rozměry, tvar a hmotnost ingotu závisí na účelu jejich použití a chemickém složení oceli. Průřez ingotů je nejčastěji čtvercový, obdélníkový, příp. kruhový. Maximální hmotnost dosahuje 3–4 t. Platí obecná zásada, že jakostnější ocel vyžaduje menší hmotnost a větší konicitu. Poměr výšky ingotů ke straně středního průřezu dosahuje u neuklidněných ocelí 3 až 3,5; u uklidněných ocelí max. 3t. (čtvercového průřezu). Větší štíhlost ingotu zvyšuje výkon při válcování, ale je méně příznivá z hlediska vnitřní čistoty oceli. Ingoty obdélníkového průřezu (bramové ingoty) se často odlévají do kokil se zvlněným povrchem. Tím se sníží nebezpečí vzniku povrchových trhlin. Např. PILSEN STEEL nabízí ingoty pro další kování nebo válcování. Tato společnost je schopna vyrobit ingoty až do 200 tun. [1–2]



**Obr. 2** Chladnoucí ingot [1–2]

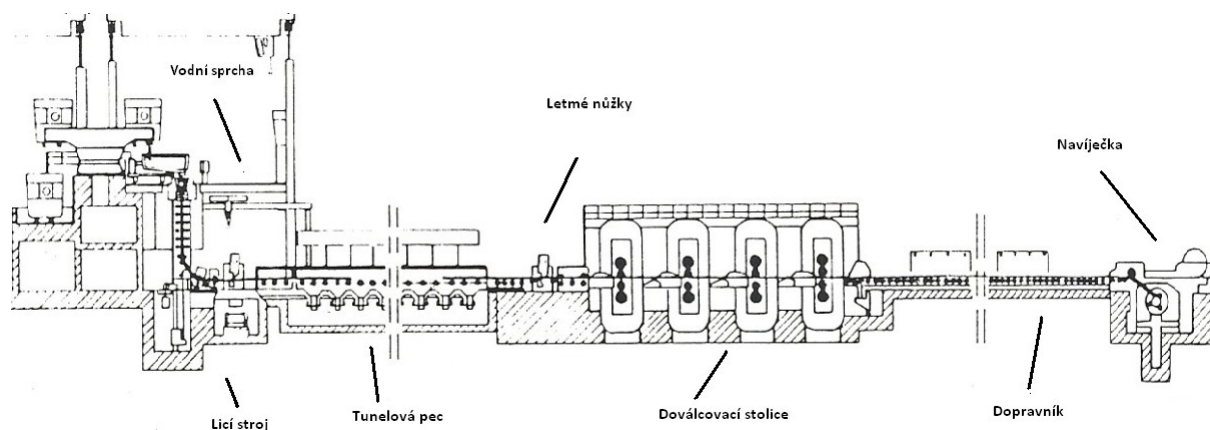
### 3. Zařízení pro plynulé odlévání bram

Moderní trend je spojit plynulé odlévání předvalků s následným válcováním a jejich úpravou. Odpadá nutnost opětovně předvalek ohřívat v pecích, což nese výhodu v ušetření tepelné energie. Ocel z elektrických pecí nebo konvertorů je přelita do pánví na plynulé odlévání oceli. V moderních ocelárnách je běžné, že ještě před převzetím oceli pro zařízení plynulého odlévání je pánev přistavena na pracoviště pánvové metalurgie, kde se provádí mimopecní zpracování oceli. Pánev je vyzvednuta na otočný držák a ocel je z ní dopravována do mezipánve. Obrázek 3 ukazuje proudění oceli z pánve (1) do mezipánve (2) a vodou chlazené měděné formy (krystalizátoru) (3). Tuhnutí začíná ve formě, kontinuálně pokračuje v sekundární zóně (4) a prochází tažnými válci (5). V některých konfiguracích následuje rovnací prvek (6), dále následuje dělicí zařízení (8), dopravní zařízení (12) dopravuje polotovary do skladu nebo horkou cestou pro konečné válcování. [3]



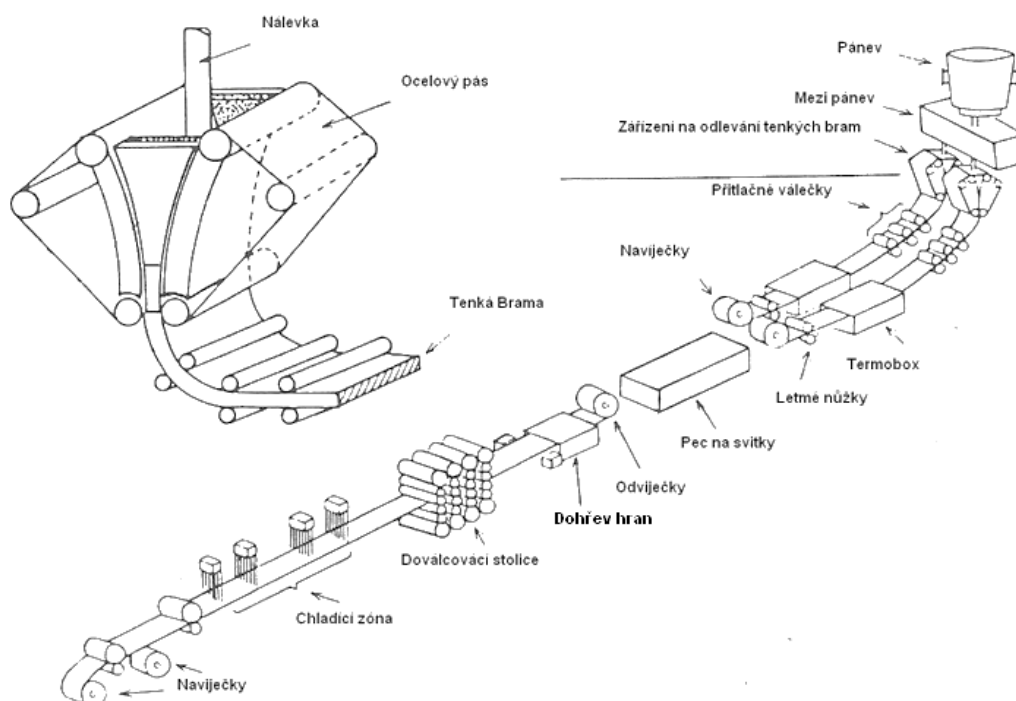
**Obr. 3** Schéma ukazuje ZPO pro plynulé odlévání bram, tj. předlitků výrazně obdélníkového profilu [3]

Na obr. 4 je zobrazena válcovací trať pro plynulé odlévání pásu Schloemann-Siemag koncepce (SMS) plynulého odlévání a válcování za tepla. (1) Lící stroj s pánvovou revolverovou hlavicí uloženou vertikálně s ohybem, (2) tunelová pec, (3) doválcovací stolice, (4) dopravník, (5) navíječka, (6) letmé nůžky, (7) vodní sprcha. [4]



**Obr. 4** Schéma válcovací kontinuité trati [4]

Na obr. 5 je znázorněno další zařízení pro plynulé odlévání bram. Jedná se o Kawasakiho koncepci, která kombinuje plynulé lití tenkých bram s válcováním za tepla. [4]



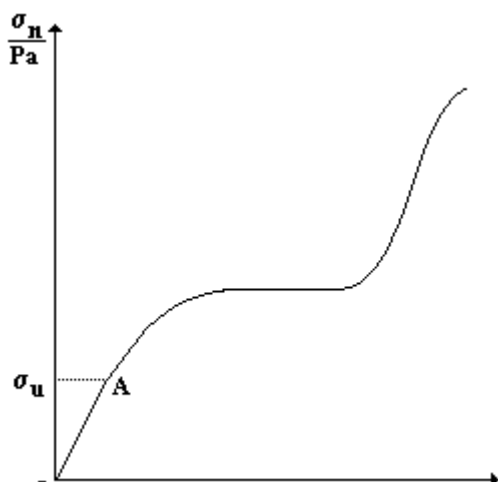
**Obr. 5** Kawasakiho koncepce, která kombinuje plynulé lití tenkých bram s válcováním za tepla [4]

## 4. Pnutí v odlitcích a kontilitých bramách

Zatímco při plynulém lití předvalků je příčinou vzniku vad vnitřní pnutí v krystalizátoru, při slévání vznikají vady vnitřním pnutím přímo v odlitcích. Tato kapitola se zabývá termomechanikou vzniku tahových napětí, která vznikají uvnitř předlitků.

### 4.1 Napětí v předlitcích

Ochlazováním kovu klesá plastická deformace a vzrůstá deformace elastická. Zvyšováním teploty v materiálu ubývá podíl jeho plastických deformací a při přechodu přes kritické pásmo dojde k naprostému omezení plastické deformace. V oblasti pružné deformace (elastické) platí Hookův zákon. Z tohoto zákona vyplývá, že čím větší bude modul pružnosti, tím bude vznikat větší napětí v materiálu.



**Obr. 6** Závislost normálového napětí na relativním prodloužení [6]

Na obr. 6 je graf závislosti normálového napětí na relativním prodloužení pro případ tyče z měkké oceli. 0–A – pružná deformace. Normálové napětí je přímo úměrné relativnímu prodloužení a platí tedy Hookův zákon. Napětí v bodě A se nazývá mez úměrnosti. Hookův zákon tedy platí do bodu A. [6]

$\sigma_u$  – normálové napětí po mez úměrnosti

$\varepsilon$  – prodloužení

### 4.2 Pnutí v předlitcích v závislosti na teplotě

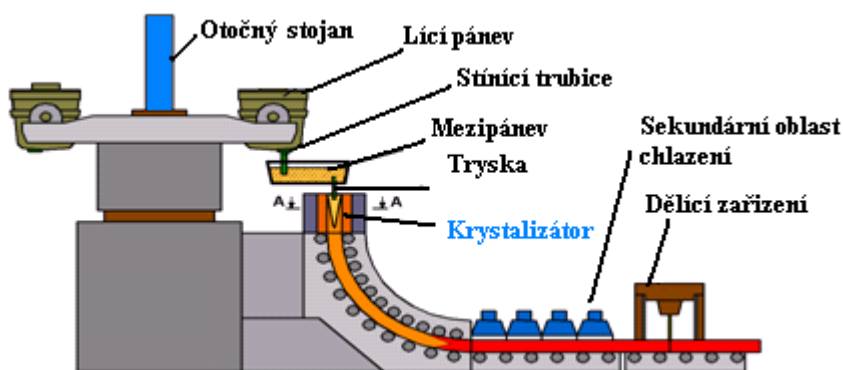
Souvislá tuhá fáze odlitku začíná dilatovat v okamžiku, kdy se vytvořila. Je nutno rozlišovat volnou tepelnou dilataci a brzděnou (ta je příčinou pnutí v předlitcích). Kladou-li dilatující části odlitku odpor (nepoddajnost formy, jádra), vzniká exogenní pnutí. S ohledem na neizotermičnost konstrukcí většiny odlitků a vlivem rozdílů teploty odlitků při nehomogenním teplotním poli dilatují jednotlivé části odlitků opět různě, brzděně a vzniká endogenní pnutí. Taktéž je tomu i u fáze transformace, s níž je spojena i změna měrného objemu. Vznikající fáze má odlišný měrný objem než fáze původní. Pokud neprobíhá změna měrného objemu současně v různých částech odlitku, způsobuje vznik transformačního pnutí.



Napětí v odlitcích proto rozdělujeme podle příčin vzniku na exogenní (smršťovací) a endogenní (zbytková tepelná, zbytková tepelná a transformační). [7]

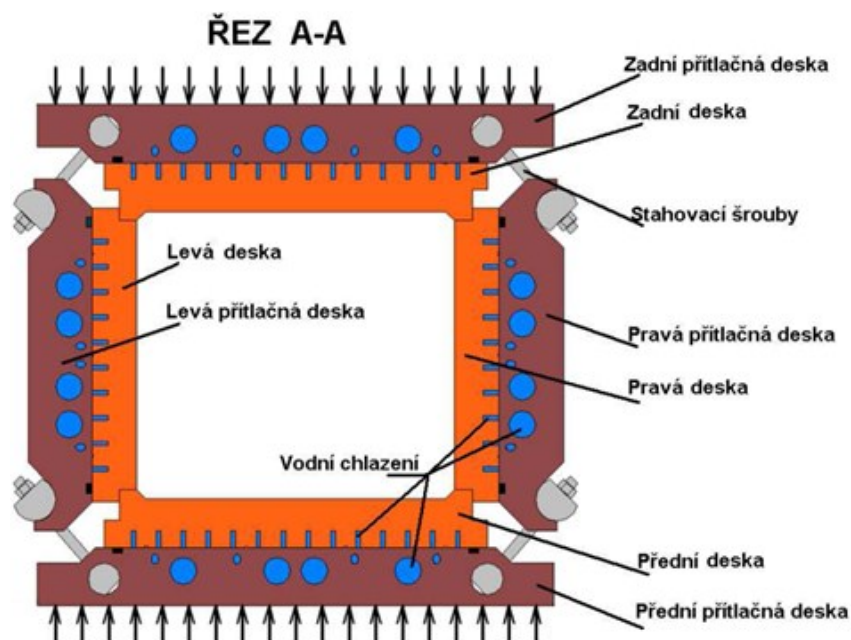
Nyní se budeme podrobněji zabývat místem vzniku vad plynule litých předlitků, tzn. krystalizátorem.

## 5. Krystalizátor



*Obr. 7 Zařízení pro plynule odlévání oceli [5]*

Tekutá ocel se dopravuje tryskou z mezipánve do prvního a nejdůležitějšího lícího uzlu, tzv. krystalizátoru, viz obr. 7. Vytváří se zde první tuhá fáze ve formě lící kůry, která se také nazývá skořepina. Krystalizátor zajišťuje ztuhnutí povrchové skořepiny o takové pevnosti, aby udržela obsah tekutého jádra při vstupu lícího proudu do sekundární zóny chlazení. Požadavky kvalitního kontislitku na krystalizátor jsou tvar, tloušťka a stejná teplota skořepiny při posuvu do sekundárního chlazení. Obr. 8 popisuje krystalizátor, který má čtyřstěnný deskovitý tvar. V jeho stěnách jsou zabudovány vodní chladicí kanály a je vyroben z čisté mědi. Stěny krystalizátoru jsou chlazeny vodou, díky tomu odvádí teplo z tuhnoucí oceli. Vnitřní povrch měděných desek je legovaný chromem nebo niklem. Získává tak požadovanou tvrdost a zabraňuje otěru mědi do roztavené oceli. Toto může být jedna z příčin vzniku povrchových vad. [3,5]

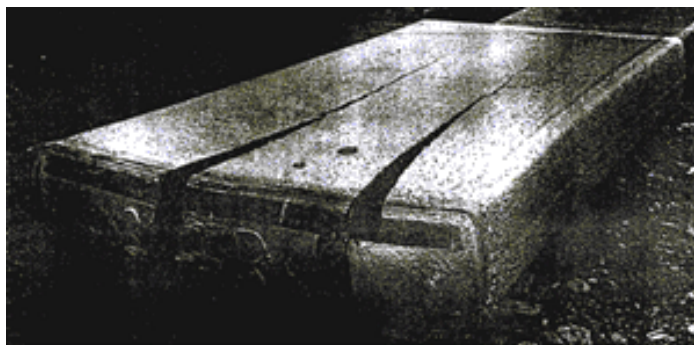


Obr. 8 Řez krystalizátorem [5]

Krystalizátor je chlazen vodou, která protéká ve frézovaných drážkách nebo vrtaných kanálech desek. V krystalizátoru se z předlitku odvádí teplo nejvíce z celého zařízení pro plynulé odlévání oceli za poměrně krátkou dobu – 10% až 30% veškerého tepla. Z toho vyplývá, že krystalizátor je velmi namáhán zejména teplotním pnutím, ferostatickým tlakem a třením v krystalizátoru. Teplo prostupuje z oceli do krystalizátoru kombinací sdílením tepla konvekcí, vedením i sáláním. Přenos tepla mezi předlitkem a krystalizátorem, jako jedné z okrajových podmínek, je složitě definovatelný a přitom klíčový problém. Hlavním předpokladem jakostní výroby na zařízení pro plynulé odlévání je dokonalá tepelná práce krystalizátoru. Většina povrchových a vnitřních vad má svou prvotní příčinu v krystalizátoru. Pod krystalizátorem je tzv. sekundární oblast chlazení s vodním ostřikem, kde se odvádí především latentní teplo tuhnutí a celý průřez předlitku postupně tuhne. Nakonec následuje terciární oblast chlazení, kde předlitek chladne volně na vzduchu při odvodu tepla konvekcí a sáláním. [3,5]

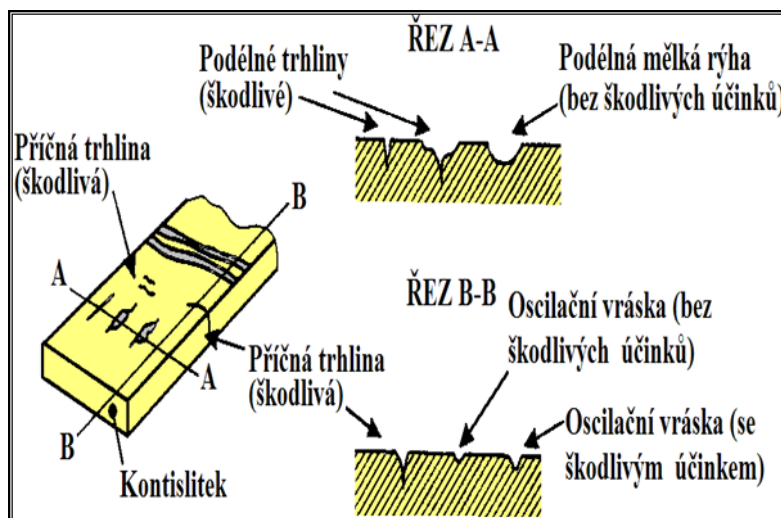
## 6. Vady plynule litých předlitků

Homogenita plynule litých předlitků je větší než u ingotů, avšak primární struktura a možnost vzniku licích vad je citlivější na licí podmínky. Vady plynule litých předlitků se dělí do dvou hlavních kategorií. Jedná se o povrchové vady a vady vnitřní. Např. na obr. 9 lze vidět podélnou povrchovou prasklinu na kontilité bramě. [8]



Obr. 9 Prasklina hliníkové bramě [8]

### 6.1 Povrchové vady plynule litých předlitků



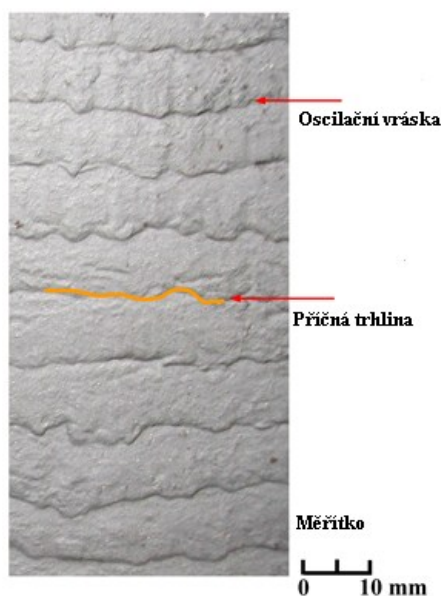
Obr. 10 Povrchové vady plynule litých předlitků [5]

Existují dva hlavní druhy povrchových vad – podélné trhliny a příčné trhliny, viz obr. 10. Podélné povrchové trhliny v porovnání s příčnými trhlínami jsou častokrát hlouběji v kontilitých bramách než příčné a mnohdy se nachází na povrchu blízko středu bramě. Podélné trhliny se následným válcováním hůř eliminují. Zejména proto jsou hlavním představitelem vadných válcovaných produktů. Tyto trhliny vznikají tzv. tahovým napětím během tuhnutí materiálu. Výskyt podélných trhlín převládá zejména při odlévání

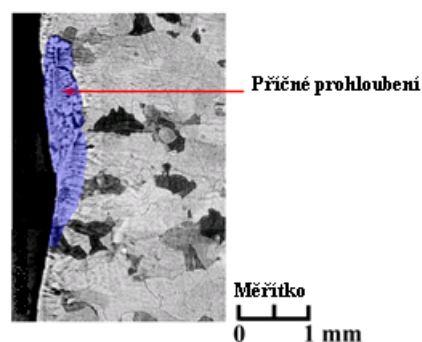
nízkouhlíkových ukladných ocelí do bramového tvaru. Tvorbu podélných trhlin podporuje zejména vyšší obsah síry oproti manganu v poměru menším než 13. Dále vysoké odlévací teploty a rychlosti, vychýlení proudu oceli a poškozené stěny krystalizátoru.

Druhým zmíněným typem povrchových vad v kontilitých materiálech jsou příčné trhliny, které jsou znázorněny na obr. 11. Tyto trhliny jsou tvořeny z důvodu teplotních gradientů. Možnost výskytu těchto vad ovlivňuje chemické složení materiálu. Tvorbu příčných trhlin podporuje vyšší obsah uhlíku a síry v oceli a rovněž nadměrné znečištění oceli škodlivými příměsemi, například mědi, cínu, niobu, vanadu a méně než 1% manganu.

Kromě těchto základních vad se dále mohou vyskytovat trhliny na hranách, příčné prohloubení (obr. 12), výronky, žebrování, přeplátování, oscilační vrásky (obr. 11), případně drobné pleny. [1, 15, 16, 17]



**Obr. 11** Povrch materiálu s oscilační vráskou a příčnou trhlinou [17]



**Obr. 12** Příčné prohloubení zobrazené v řezu materiálu [17]

## 6.2 Vnitřní vady

Mezi vnitřní vady patří vnitřní trhliny, osová a středová pórovitost, odměšování a nekovové vměstky.

Z uvedených vad je pro plynulé lití typická osová středová pórovitost. Vznik této vady souvisí úzce s postupem tuhnutí plynule litých předlitků, kde krystalizace postupuje v podobě protáhlého V. K této vadě jsou zvláště náchylné předlitky se čtvercovým a kruhovým průřezem. Příčinami vzniku této vady jsou především vysoké odlévací rychlosti, případně velká intenzita sekundárního chlazení.

Intenzita odměšování u plynule litých předlitků je vzhledem k menším průřezům podstatně nižší než u ingotů. Rychlé tuhnutí předlitků podporuje stejnoměrné rozdělení síry a ostatních prvků, takže v celém průřezu se nevyskytují silně vycezená místa. Množství nekovových vměstků může být u plynule litých předlitků větší než u ingotů. To souvisí se zvýšenou oxidací oceli při lití a nemožností vyplavání vměstků do hlavy ingotu. Menší průřez předlitku a jeho rychlejší ochlazování však zabraňují zvýšeným koncentracím vměstků a jejich rozdělení je rovnoměrnější. Jejich nepříznivý vliv se tímto ve srovnání s ingoty zmenšuje. [1]

Jak už bylo vysvětleno v předchozích kapitolách, vady na ZPO a v odlitcích vznikají ferostatickým tlakem a vnitřním pnutím. V následující kapitole se budeme zabývat některými známými vadami v odlitcích. Tyto vady jsou velmi podobné a detailně popsány v literatuře, proto si myslím, že stojí za zmínku.

## 7. Vady ingotů

- a) trhliny podélné, příčné, vlasové
- b) licí vady přelití kůže, studené svary, pleny, písková místa na povrchu [1,7]

### 7.1 Povrchové vady

Trhliny vznikají většinou v teplém stavu po odlití a jejich okolí je znečištěno likvacemi a segregacemi. Zvláště náchylné ke vzniku trhlin jsou ingoty kruhového průřezu nebo ingoty s velkým poloměrem zaoblení hran, následkem nepříznivého poměru mezi objemem a povrchem ingotu. Podélné trhliny, viz obr. 13, vznikají nejčastěji při příliš rychlém lití, příp. při nesymetrickém lití. Příčné trhliny zpravidla způsobuje nerovný povrch kokil, který zabraňuje stejnoměrnému smršťování ingotu. [1,7]



**Obr. 13** Trhlina pod nálitkem u tenkostěnného ocelového odlitku [7]

## 7.2 Vady vnitřní

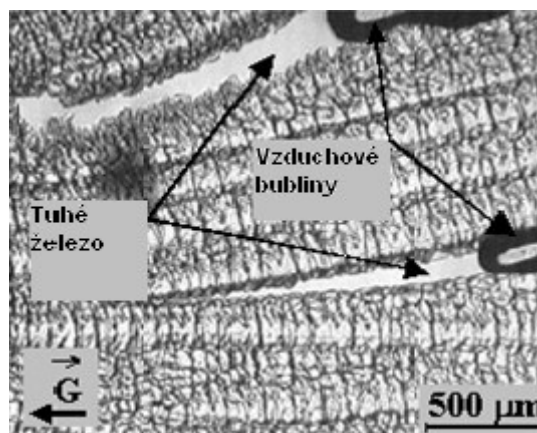
- a) staženiny
- b) plynové bubliny
- c) likvace
- d) nekovové vměstky
- e) vnitřní trhliny

### 7.2.2 Staženiny (lunkry)

Vznikají následkem objemových rozdílů tekuté a tuhé fáze. Okolí staženiny je vždy značně znečištěno. Zvětšení hloubky staženiny podporuje větší hmotnost a štíhlost ingotu, odlévání oceli spodem a nižší teplotu odlévané oceli. Hloubku staženiny lze podstatně snížit zvýšenou teplotou kovu ve ztracené hlavě (exozásypy, izolační vložky atd.). [1]

### 7.2.3 Plynové bubliny

V tekuté oceli se rozpouští značné množství plynů, hlavně oxidy uhlíku, dusík a vodík. Při tuhnutí oceli se tyto plyny vylučují, a pokud zůstávají v oceli, jsou příčinou vzniku dutin bublin a pórů. Podpovrchové bubliny na obr. 14 se u neuklidněných ocelí vyskytují v určitých hloubkách pod povrchem v pravidelném



uspořádání podpovrchových věnců. Poněvadž tyto bubliny mají kovově čistý povrch, mohou se při tváření zavařit. Aby se zamezilo oxidaci stěn bublin při ohřevu, je nutné uložení bublin nejméně 10 mm pod povrchem. [1,7,8]

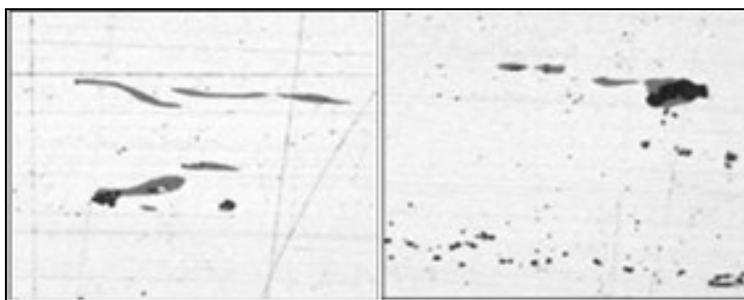
Obr. 14 Plynové bubliny v tuhé oceli [8]

### 7.2.4 Likvace

Při tuhnutí oceli vznikají koncentrační rozdíly v obsazích některých prvků v jednotlivých částech ingotů. Likvace může být krystalická nebo dendritická (nestejnorodost v rámci jednotlivých krystalů), pásmová a nejčastěji osová. Největší sklon k likvacím má síra, fosfor a uhlík. Stupeň likvace roste se zvětšující se hmotností ingotu a je větší u ocelí neuklidněných. Největší rozdíly v obsazích C a S mají oceli s nejnižším obsahem C, což je způsobeno zvýšeným varem oceli v kokile. Se stoupajícím obsahem C v oceli se stupeň odmíšení C a S postupně snižuje. Stupeň odmíšení fosforu nevykazuje zřetelnou závislost na obsahu uhlíku v oceli. [1]

### 7.2.5 Nekovové vměstky

Dostávají se do oceli buď ze zplodin desoxidace a dalších reakcí v oceli, nebo erozí a korozí licího zařízení, příp. stržením nečistot z plovoucí hladiny kovu



při odlévání. Dostanou-li se při tváření vměstky pod povrch, způsobují typické krátké podélné

**Obr. 15** Nekovové vměstky v oceli. Tmavě šedou barvou jsou znázorněny oxidy a světle šedou jsou znázorněny sulfidy. [9]

trhliny, viz obr. 15. Spolu s bublinami a vycezeninami se usměřují do hlavního směru tváření a vytváří charakteristickou řádkovitost. Vměstky mohou působit jako krystalizační zárodky při tuhnutí (primární struktura) nebo při rozpadových strukturách tuhého roztoku (sekundární struktura). [1,9]

### 7.2.6 Vnitřní trhliny

Vnitřní trhliny jsou převážně vločkovitého charakteru a vyskytují se v jádrových částech. Příčinou jejich vzniku je změna rozpustnosti vodíku v austenitu a ve feritu způsobující vnitřní pnutí. Vločky vznikají při teplotách kolem 200 až 300°C. Nejvíce náchylné ke vzniku vloček jsou oceli martenzitického typu, legované Cr, Cr – Ni a hlavně Cr – Ni – Mo. Méně náchylné jsou oceli perlitické a takřka vůbec vysokolegované monofázové oceli. [1]



## 8. Vady válcovenského původu

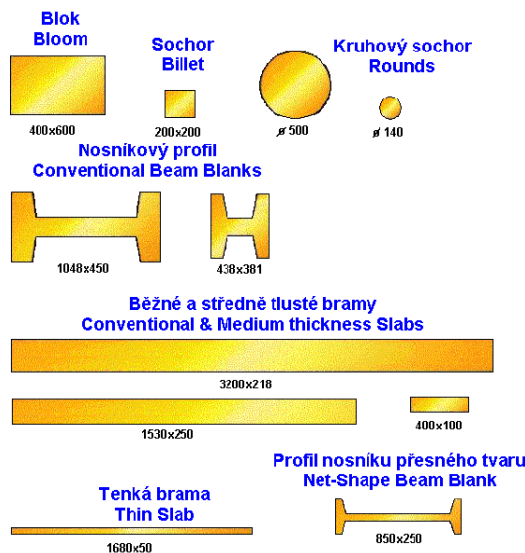
V předchozích kapitolách jsme rozebírali zejména materiálové vady. Vady obecně vznikají z nejrůznějších příčin. Jsou to například vlivy vnitřní, vnější a také vlivy typické pro jednotlivé fáze výroby. Nyní se budeme zabývat vadami, které vznikají v procesu válcování.

a) Vady z nesprávného ohřevu, jako trhliny z tepelného pnutí při nevhodné rychlosti ohřevu, spálení oceli, přehřátí oceli, oduhličení a nauhličení oceli a vady z nerovnoměrného ohřevu.

b) Vady vzniklé při válcování, jako vadné rozměry a tvary plechů, okrajové přeložky, trhliny na bočních hranách, potrhání plechů při příliš velkém tlaku – pošití, zátlaky na povrchu plechů, trhliny z tepelného pnutí při nesprávném chladnutí, okrajová nebo středová vlnitost při nerovnoměrné deformaci a nerovnoměrný příčný průřez vybočující z dovolených úchylek tloušťky. Výrobky válcovny, tak jak vyjdou z válců, nemohou být dodávány spotřebitelům. [10]

Výše uvedenými způsoby v kapitole Rozdělení výchozích materiálů a ZPO se odlévají různé typy předvalků požadovaných tvarů, jako jsou bloky, bramy, plošiny a sochory.

## 9. Rozdělení předvalků a jejich zpracovávání



Obr. 16 Rozdělení předvalků [3]

Na obr. 16 vidíme druhy plynule litých předvalků, které se vyrábí v běžných válcovnách. Plynule lité předvalky (kontislitky) se rozdělují:

- a) bloky – mají přibližně čtvercový průřez s poměrem stran do 1 : 1,4 a jsou větší než 140 mm;
- b) bramy – mají obdélníkový průřez s poměrem stran nad 1 : 1,4 a vyrábí se v tloušťkách větších než 80 mm a šířkách menších než 2 000 mm;
- c) ploštiny – vyrábí se v tloušťkách 6 ÷ 36 mm a šířkách < 300 mm;
- d) sochory – s poměrem stran do 1 : 2, s rozsahem větším než 40 mm a v průměru 90 ÷ 210 mm. [12]

Tyto předvalky se dále zpracovávají na předvalkových tratích a většinou jednostolicovou nebo vícešticovou blokovnou. Používá se válcovací duo nebo válcovací kvarto. Podle technologie válcování bloků a bram se předvalek zahřeje na požadovanou teplotu v hlubinných pecích, dopraví se do válcovací stolice, kde se válcuje na požadované rozměry devíti až devatenácti průchody. Počet průchodů závisí na konečném rozměru bram či bloků. Toto nese výhody, jako zlepšování lící struktury a uzavírání podpovrchových bublin. Mezi předvalkové tratě patří blokovny, slabing a sochorová trať. [12]

## 9.1 Blokovna

Jedná se o těžké předvalkové tratě pro válcování ingotového předvalku. Válcuje bloky čtvercového průřezu, popř. i bramy do šířky 1 200 mm. Předvalek se ohřeje v hlubinné peci a válcuje se na vratném duu s masivními manipulátory. [1,12]

## 9.2 Slabing

Jedná se o válcovací tratě pro válcování bram na vodorovných a svislých hladkých válcích. Pro odstranění úkosu se nejdříve válcuje nastojato, až poté se válcuje naplocho. V dnešní době se však už tento způsob nepoužívá, protože byl nahrazen kontilitím. [1,12]

## 9.3 Sochorové tratě

Válcovací stolice, která se používá pro válcování sochorů a ploštin, je moderní – spojitá trať s kalibrovanými válci (skříňové, kosočtverec – čtverec, ovál – čtverec, ovál – kruh). [1,12]

Hned po odlití se předvalek vyválcuje až do jeho konečné podoby. Nyní se zaměříme na jeho konečnou formu, kterou jsou pásy, tlusté a tenké plechy.

## 10. Válcování plochých vývalků

### 10.1 Tlusté plechy

Tlusté plechy mají podobu plochých vývalků, které mají po celé délce plný průřez. Hranicí mezi tlustými a tenkými plechy je tloušťka 3 mm. Šířka plechů může být až 5 m, maximální tloušťka až 100 mm. Mezi výchozí polotovary patří bramové ingoty (až 100 tun), plynule lité bramy, válcované nebo kované bramy. Tyto polotovary se ohřívají v průběžných krokových či narážecích pecích a válcují se zejména na jednostolicových (méně dvoustolicových aj.) vratných tratích (kvarto či duo stolice). Je zde možnost naválcovat šířku, otočit rozvalek o 90° a doválcovat délku (omezení anizotropie). Válcovací stolice jsou vybaveny dvěma nezávislými systémy stavění: elektromechanickým hrubým stavěním mezi průchody a jemným hydraulickým stavěním během průchodu. Válcování plechů je spojeno s různými úpravenskými zařízeními (pro zrychlené ochlazování, chladicí lože, zařízení pro dělení a pece pro tepelné zpracování). [1,14]

### 10.2 Pásy válcované za tepla

Oproti válcování tlustých či tenkých plechů mají pásy rozhodující podíl z celkově vyráběného množství plochých vývalků. Válcování probíhá na válcovacích tratích pro válcování pásu. Jsou zde dvě válcovací stolice uloženy za sebou a pásy jsou posunovány po válečkových dopravnících, viz obr. 17. Vyrábějí se v tloušťkách od 0,8 až 35 mm, v šířkách až do 2,3 m, svitky



*Obr. 17 Válcování plechů [14]*

do hmotnosti 45 tun. Hlavní druhy válcovacích tratí: spojitá, polospojitá, Steckelova trať, vratná kompaktní a planetová. U spojitých tratí hraje problematickou roli teplotní klín, který má chladnější konec pásu až o 90°C. Z tohoto důvodu je zavedena technologie válcování pásů

s přirychlením, neboli speed up technologie. Technologie spočívá ve zrychlení válcovací rychlosti hotovního pořadí v okamžiku uchopení pásu navíječkou, čímž se chladnější rychleji válcované zadní části pásu ohřívají deformačním teplem. [1,12,14]

Válcovaný pás požadované délky se potom navíjí do svitku.

### 10.3 Steckelova trať

Steckelova trať má vratnou stolici kvarto s navíječkami válcovaného pásu umístěnými v ohřívacích pecích. Používá se především pro válcování pásů z ocelí obtížně tvařitelných za tepla, např. korozivzdorných. Na obr. 18 je zobrazena svitková skříň. Zde se rozvalek svine do svitku, tím si uchovává teplo a vyrovnává teplotu. Teplotní klín se po délce zmenší asi na 20 °C. Po vyválnování hotového materiálu a navinutí do svitku, jako například u válcovaných pásů, musí materiál projít ještě dalšími úpravami.



*Obr. 18 Svitková skříň [12]*

[12]

### 10.4 Stroje na úpravu válcovaného materiálu

Válcovaný materiál prochází po svém vyválnování mnohými operacemi. Je to například rovnání, řezání na požadované délky, stříhání po délce a šířce, frézování, vrtání, navíjení.

Konstrukce jednotlivých zařízení závisí na podmínkách a způsobu výroby. Podle toho jsou i jednotlivá zařízení různá. Rozeznáváme zařízení na dělení válcovaného materiálu, zařízení na rovnání a navíjecí zařízení. [11]

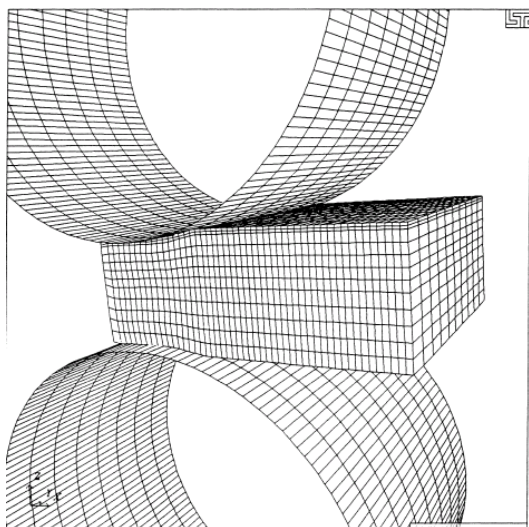
Po plynulém odlití předvalku, jeho vyválnování a úpravě se zaměříme na analyzování povrchových trhlin.

## 11. Matematické modelování podélných a příčných trhlin

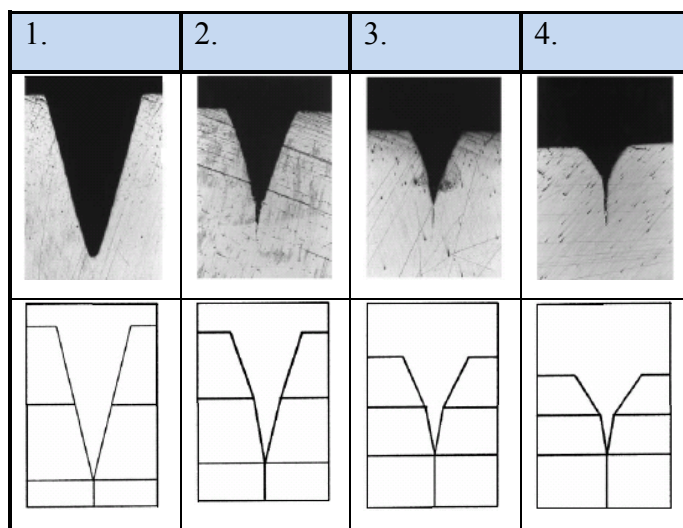
V časopise *Technologie zpracování materiálu* byl publikován článek *Chování podélných a příčných povrchových trhlin při válcování za tepla*. V něm autoři Esa Ervasti a Ulfa Stahlberg navrhly simulační modely na základě chování zkoumaného materiálu, který byl válcován v provozu. Jednalo se o výzkum chování podélných a příčných povrchových trhlin na ocelových bramách, které byly válcovány za tepla. Získaná data z průmyslu (originálu) byla použita jako atributy pro vznik matematického modelu. Cílem jejich práce bylo porovnat data získaná ze simulačních modelů s referenčními údaji získanými z průmyslu a ověřit správnost matematického modelování. Dále zjistit, zda je možné eliminovat nežádoucí trhliny nebo minimalizovat jejich škodlivý vliv následným válcováním a vybrat nejlepší způsob válcování pro omezení povrchových trhlin. [15–16]

### 11.1 Prvková síť simulačních modelů

Simulační model je dynamickým systémem, který je složen z konečno prvkové sítě. Na obr. 19 je zobrazen model válcování, ve kterém se brama nahradila sítí konečných prvků. Na této bramě je situována trhlina a její chování popisuje částečná konečno prvková síť, která byla zkompletována z pěti uzlů V – tvaru praskliny, viz obr. 20. Na tomto obrázku je zobrazeno porovnání skutečných trhlin a modelů složených z prvků, zároveň lze vypořizovat, jak tyto modely trhlin postupným válcováním mění svůj tvar. Chování modelu trhliny bylo po následném válcování posuzováno pomocí nových pozic uzlů. Matematický model byl zjednodušený tak, že deformace bramy je konstantní po šířce, tzn. model nezahrnuje vliv prohýbání válců. [15–16]



Obr. 19 Průběh simulace složený z elementů



Obr. 20 Porovnání skutečných trhlin a trhlin složených z prvků

## 11.2 Nastavení simulace

Nastavení simulačních modelů výchozího materiálu bylo stanoveno: ocelová brama o délce 550 mm, výšce 220 mm a chemickém složení, viz tab. 1. Na těchto modelech bram jsou vytvořeny trhliny tvaru písmene V s výchozí výškou 10 mm. Simulační modely chování trhliny při válcování za tepla zahrnují referenční atributy, jako je vliv tření, poloměr válců a postupy válcování. Vliv koeficientu tření je modelován na základě hodnot 0,20, 0,35 a 0,50. Hodnoty poloměrů válců jsou 225 mm, 445 mm, 625 mm. Modely také zahrnují tři válcovací postupy, viz tab. 2. [15–16]

Tabulka 1 Chemické složení vzorku

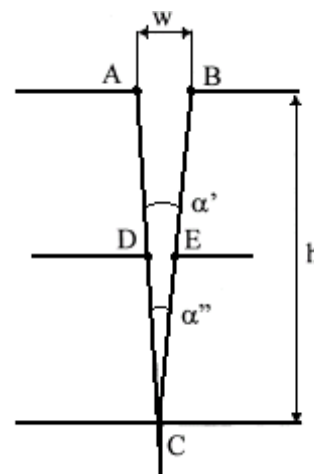
Chemické složení vzorku (%)						
C	Si	Cr	Mn	P	S	Cu
0.12	0.2	0.0.8	0.5	0.01	0.03	0.1

Tabulka 2 Válcovací plány

Válcovací plány	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>	H <sub>5</sub>	H <sub>6</sub>	H <sub>7</sub>	H <sub>8</sub>	H <sub>9</sub>	H <sub>10</sub>	H <sub>11</sub>	H <sub>12</sub>	H <sub>13</sub>	H <sub>14</sub>
lehký plán	220	205	190	175	160	145	130	115	100	85	70	55	40	30
střední plán	220	190	160	130	100	75	50	30						
těžký plán	220	175	130	85	50	30								

### 11.3 Parametry simulace

Konečná data vzniklá z výsledků simulačních modelů se zapisují do grafů a tabulek a dále vyhodnocují. Poloha uzlů po válcování je znázorněna v tabulkách a porovnána po každém následném válcování. Z obrázku 21 je patrné, že bylo použito pět parametrů k popisu chování modelů trhliny, a to:  $h$  – výška trhliny,  $H$  – výška bramy,  $w$  – šířka trhliny,  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  – úhel trhliny na spodní části a horní části. Poměr  $h/H$  popisuje, jak se výška trhliny mění vůči výšce vzorku. Úhly popisují nebezpečí vzniku vady. Čím menší po následném válcování tyto úhly budou, tím je větší riziko vzniku zoxidování povrchu uvnitř trhliny. Šířka  $w$  je používána pro kompletní popis trhliny během válcování. V nejlepším případě se bude zmenšovat hloubka trhliny  $h$ , šířka  $w$  se bude zvětšovat, což znamená, že se spodní část trhliny bude zvedat k povrchu bramy. [15–16]

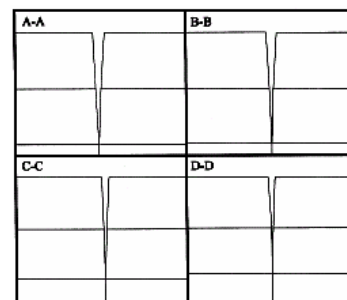


Obr. 21 Vlastnosti trhliny [15–16]

### 11.4 Geometrie chování trhlín během úběru válců

#### 11.4.1 Chování modelu podélné trhliny během válcování

Během válcování se vstupní data prvků dynamického modelu trhliny zkoumala ve čtyřech polohách, viz obr 22. Jsou označena jako příčný řez A-A před vstupem do válcovací mezery, B-B v pásmu opožďování, C-C v pásmu přilnutí, D-D v pásmu předstihu. Simulační model byl nastaven těmito



Obr. 22 Geometrie trhliny během válcování

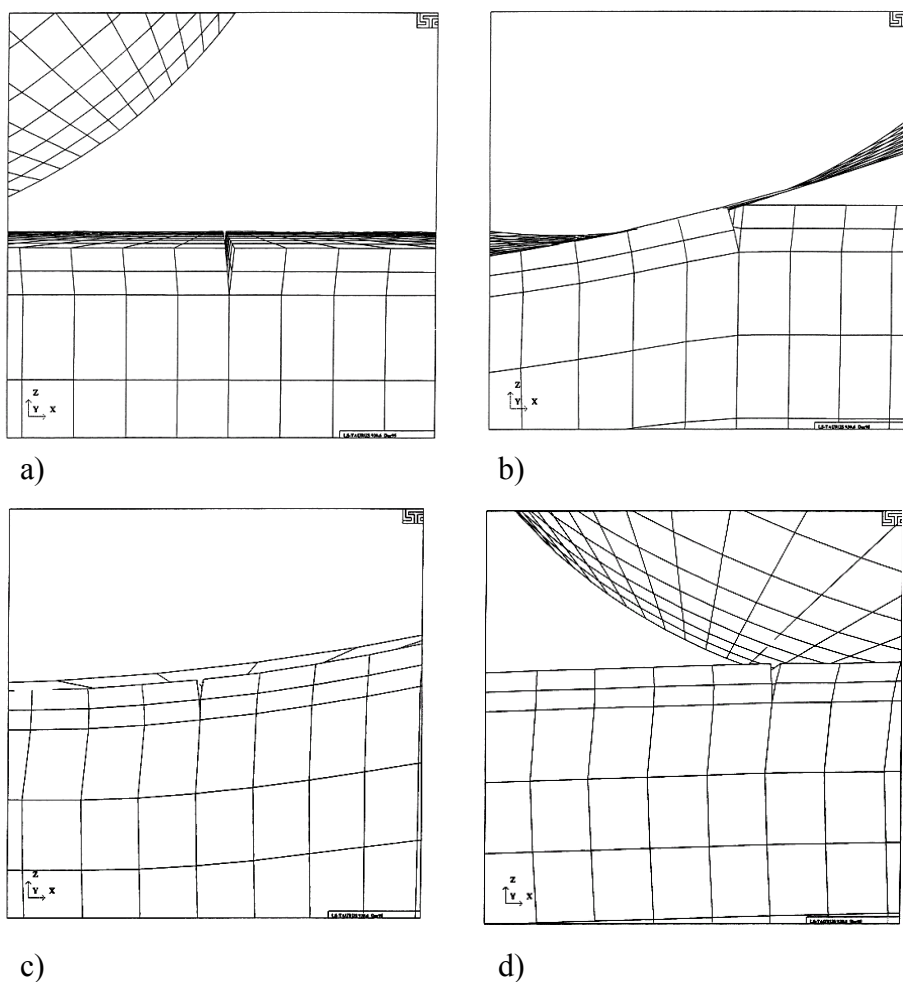
atributy,  $R=425\text{ mm}$ ,  $H_0=220\text{ mm}$ ,  $H_1=190\text{ mm}$  a  $\mu=0,2$ .

Z obr. 22 je jasné, že trhlina je lehce deformovaná těsně před vstupem do válcovací mezery, v příčném řezu B-B. Pro tuto polohu se již spodní úhel  $\alpha''$  trochu zmenšil. V pásmu předstihu oba úhly  $\alpha'$  a  $\alpha''$  zmenší svou velikost. Zmenšení spodního úhlu  $\alpha''$  je tak velké, že je jasné riziko zbývajícího defektu. [15–16]



### 11.4.2 Chování modelu příčné trhliny během válcování

I v tomto případě se během válcování vstupní data prvků dynamického modelu trhliny zkoumala ve čtyřech polohách, viz obr. 23. Trhlina před deformací je znázorněna na obr. 23a. Trhlina se pak v pásmu opožďování po vstupu do válcovací mezeru rozšíří, viz obr. 23b. Válec zachytí první okraj trhliny a začne ji vytahovat, druhá část je ještě v relativním klidu oproti první části trhliny. Rychlost válce je vyšší než rychlost bramy. To vysvětluje silné rozšíření trhliny. Když je trhlina uvnitř válcovací mezeru v pásmu přilnutí rozšířena, zmenší se její šířka kvůli vysokému hydrostatickému tlaku, viz obr. 23c. Geometrie trhliny po válcování je znázorněna na obr. 23d. V pásmu předstihu se opět trhlina rozšířila, ale ne tak zásadně, jako v pásmu opožďování. To autoři vysvětlují faktem, že se přední okraj trhliny pohybuje po průchodu válcovací mezerou maximální rychlostí, zatímco druhý okraj trhliny je zpomalován válcem. Důvodem, proč toto rozevření není tak významné, je fakt, že při výstupu nedochází k žádné změně směru posuvu materiálu. [15–16]



**Obr. 23** Geometrie trhliny během válcování [15–16]

## 11.5 Způsoby uzavírání trhliny během válcování

Ideální způsob chování trhliny při válcování za tepla by měl probíhat tak, aby se šířka trhliny rovnoměrně s deformací zvětšovala a výška se úměrně s deformací zmenšovala. To znamená, že trhlina má počáteční tvar V, boční strany se posunují do stran až do roviny povrchu, spodní část trhliny vychází k povrchu materiálu. Naopak nevhodný způsob je, když trhlina po deformaci má tvar písmene Y, to znamená, že spodní část trhliny se od spodu spojuje až k povrchu. Zde dojde k zavaření trhliny tlakem válců na okraje trhliny. V tomto případě je velká pravděpodobnost zoxidování povrchu trhliny. [15–16]

## 11.6 Výsledky simulace podélné trhliny

Podle výsledků simulace je zřejmé, že koeficient tření neovlivňuje chování trhliny následným válcováním, z tohoto hlediska můžeme vliv koeficientu tření zanedbat.

Při použití různých poloměrů válců bylo zjištěno, že nejmenší šířka trhliny vznikla při největším poloměru zvoleného válce. Pokud se bude šířka razantně zmenšovat, je zde větší riziko zaválcování zoxidovaného povrchu trhliny, a proto je vhodné, použít co nejmenší poloměr válců. Pokud se jedná o poměr  $h/H$ , klesá tato hodnota lineárně. Použití různých poloměrů válců hloubku trhliny výrazně neovlivňuje.

Z hlediska různých válcovacích postupů je nejvhodnější použít těžký válcovací plán. V tomto případě se šířka trhliny nezmenšuje tak razantním způsobem. Z výsledků je zřejmé, že se zmenšuje spodní úhel trhliny  $\alpha'$  a horní úhel trhliny  $\alpha''$  zůstává stejný, vzniká tak trhlina tvaru Y. Zde je velká pravděpodobnost, že povrch bude zoxidovaný. Je nemožné, aby se zabránilo tvorbě trhliny ve tvaru Y. K tvorbě takovéto trhliny dochází bez ohledu na výběr válcovacího postupu, poloměru válců a tření. Také nezabráníme vytvoření zoxidované trhliny optimalizováním válcovacích podmínek. Proto je navrhován jako nejlepší způsob zavaření trhliny zaválcováním ihned na začátku válcování, v tomto případě by se mohly aspoň snížit nežádoucí účinky trhliny. [15–16]

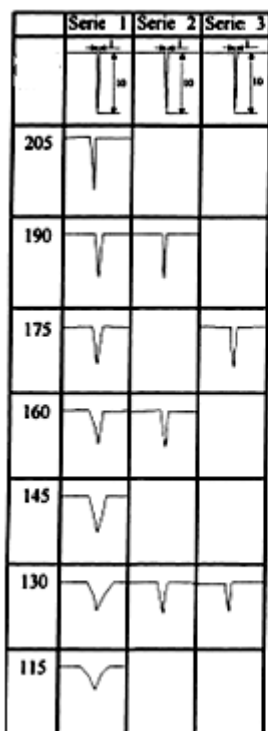
## 11.7 Výsledky simulace příčné trhliny

Z hlediska vlivu koeficientu tření na chování příčné trhliny je tento činitel významný. Z grafu je zřejmé, že šířka trhliny  $w$  je silně ovlivněna vlivem koeficientu tření. Větší koeficient tření

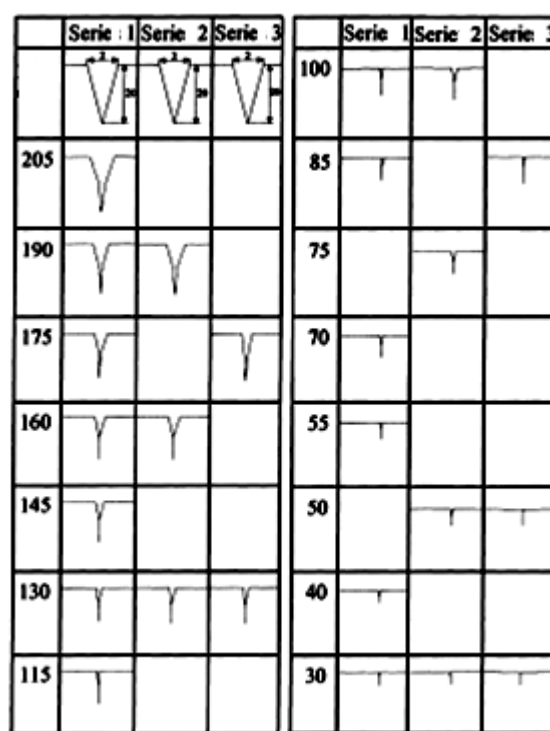
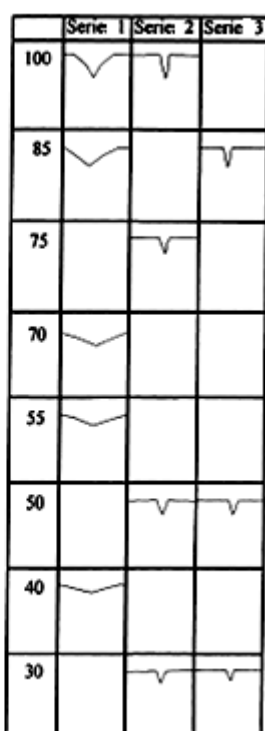
zvětšuje smykové napětí, což má za následek razantní rozšíření trhliny. Nejlepších výsledků lze dosáhnout při použití koeficientu tření  $\mu = 0,5$ .

Vliv poloměrů válců byl modelován při koeficientu tření  $\mu = 0,2$ . Lepších výsledků bylo získáno při malém poloměru válců, zde dochází k účinnějšímu zmenšení výšky trhliny při velkém rozšíření  $w$ . Grafickým posouzením trhliny bylo zjištěno, že při velkých poloměrech válců je vysoké riziko vzniku trhliny tvaru Y, což se dá vysvětlit velkým hydrostatickým tlakem, který působí na okraje trhliny. V tomto případě je velké riziko zoxidování povrchu uvnitř trhliny.

Vliv válcovacích plánů je také velmi významný činitel, který ovlivňuje chování příčné trhliny. Z obr. č. 24 je zcela zřejmé, že lehký válcovací plán je prospěšný a má za následek velký nárůst šířky  $w$  a největší pokles výšky  $h$ . Z pohledu obou úhlů lze vyčíst, že se oba razantně zvětšily při lehkém válcovacím plánu. V tomto případě se trhlina zcela otevřela a tím se eliminovala. Středním válcovacím plánem se trhlina začne lehce tvarovat do tvaru Y, ale potom se narovná a zase rozšíří. V tomto případě se nedoporučuje těžký válcovací plán. Je nezbytně důležité válcovat postupným válcováním zpětným způsobem. Reverzní válcování totiž drží trhlinu ve vzpřímené poloze tvaru V. Pokud tedy zvolíme malé poloměry válců a lehký válcovací plán, vyválčujeme trhlinu zcela. Na obr. 25 jsou pro srovnání zobrazeny výsledky simulace podélných trhlín s trhlínami příčnými. [15–16]



Obr. 24 Chování příčné trhliny



Obr. 25 Chování podélné trhliny

## 11.8 Zhodnocení výsledků matematického modelování

Po porovnání získaných dat z matematických modelů s daty získanými z průmyslu bylo zjištěno, že model je správný. Dále bylo zjištěno, že podélné trhliny se nedají následně válcovat bez škodlivých defektů na ocelových Bramách.

Je nevýhodné, že **E. Ervasti a U. Stahlberg** ve svých matematických modelech nebrali v potaz prohýbání válců, což mělo za následek, že podélné trhliny se neohýbají do stran.

[15–16]

## 12. Návrh experimentu a cíle práce

V praktické části své bakalářské práce jsem se inspiroval studií *Chování podélných a příčných povrchových trhlin při válcování za tepla* od autorů Esa Ervastiho a Ulfa Stahlberga. [15–16] Pokusil jsem se v podmínkách laboratoře kování a válcování katedry tváření materiálu napodobit jejich matematické modely, laboratorním válcováním. Výchozí materiál určený pro válcování byl podobný matematickému modelu. Jednalo se o ocel ČSN třídy 12 040 o chemickém složení C 0.32%–0.40%, Cr 0.25%, Cu 0.30%, Mn 0.5%–0.8%, Ni 0.30%, P 0.04%, S 0.04%, Si 0.15%–0.40%. Do materiálu jsem vytvořil vruby, které měly simulovat podélné a příčné trhliny. Jednalo se o trhliny V-tvaru se shodným úhlem 30°. Každá série vzorků měla rozdílnou hloubku trhliny. Po zohlednění podmínek válcování ve zmiňovaném textu, jako jsou výchozí velikost bramy a deformace, jsem vybral postup pro válcování. Zvolil jsem způsob válcování v jednom směru na válcovací stolici kvarto. Válcování jednotlivých vzorků probíhalo za tepla. Do materiálu byly vytvořeny 4 příčné trhliny na horní straně a čtyři podélné trhliny na dolní straně. Ze vzniklých výsledků jsem vytvořil grafy v závislosti na výšce, šířce a obsahu na poměrné deformaci, trhliny v programu Microsoft Office Excel. Hodnoty jednotlivých trhlin, které jsem použil do grafu, jsem navzájem porovnával. Zohlednil jsem tvar a úhel trhliny na jednotlivých vzorcích. Dále jsem porovnával geometrický tvar trhlin s matematickou simulací, taktéž jsem zhodnotil, zdali je možné nasimulovat vady kontilitých bram v laboratorních podmínkách. Pomocí získaných výsledků jsem analyzoval chování povrchových trhlin při válcování za tepla.

## 12.1 Popis experimentu

### 12.1.1 Válcovací postup

Výchozí bramy jsme ohřáli v ohřívací peci na teplotu 1 100 °C, těchto bram bylo celkem deset. Poté jsme je válcovali v jednom směru na válcovací stolici K 302 s jmenovitým průměrem válců 140 mm. Každou bramu jsme válcovali jinou velikostí deformace. Velikosti jednotlivých úběrů jsou vyhodnoceny v tabulce 3., přičemž:

**Tabulka 3** Výšky vzorků po deformaci

Číslo vzorku	H	$\Delta H$	$\varepsilon_h$
0	11,70	0,00	0,0
1	10,70	1,00	8,5
2	10,35	1,35	12,6
3	10,00	1,70	16,4
4	9,65	2,05	20,5
5	9,30	2,40	24,9
6	8,95	2,75	29,6
7	8,60	3,10	34,6
8	8,25	3,45	40,1
9	7,90	3,80	46,1
10	7,55	4,15	52,5

$H$  – výška vzorku (výška po deformaci)

$\Delta H$  – absolutní úběr

$\varepsilon_h$  – poměrná deformace (%)

kde

$$\Delta H = H_0 - H_1 \dots \dots \dots (1)$$

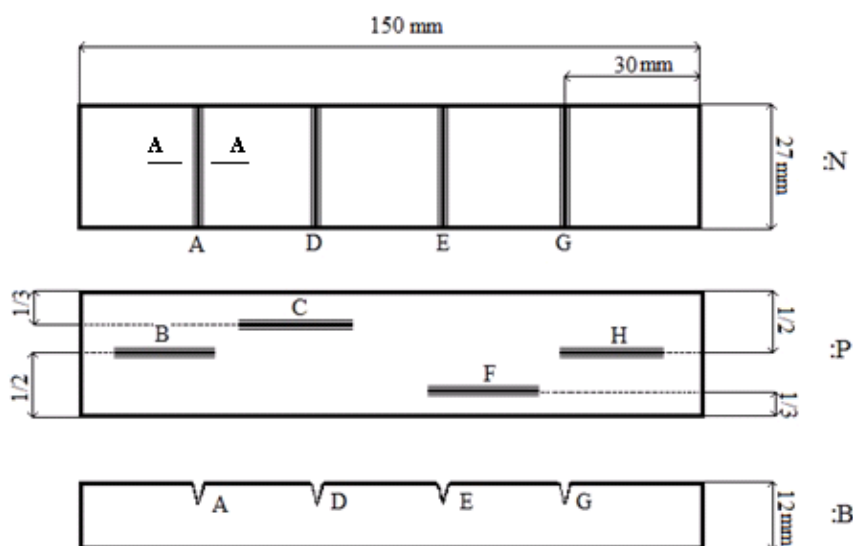
$$\varepsilon_h = \frac{\Delta H}{H} \cdot 100 \dots \dots \dots (2)$$

Nakonec jsem válcované bramy po zchladnutí rozřezal na pásové pile na jednotlivé kousky tak, aby trhlina byla situována ve středu vzorku, viz obr. 26. Tyto vzorky popisuje parametr  $H$  z hlediska výšky vzorku po deformaci. Dále jsem tyto vzorky označil písmeny A–H podle toho, jak jdou za sebou trhliny zleva doprava.

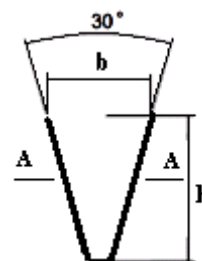


**Obr. 26** Rozřezané vzorky

### 12.1.2 Použité parametry



Obr. 27 Schéma výchozí bramy



Obr. 28 Schéma trhliny

Na obr. 27 je znázorněno schéma výchozí bramy. Na těchto bramách jsou vytvořeny příčné trhliny na horní straně a podélné trhliny na straně spodní. Na obr. 28 je zobrazeno schéma řezu trhlinou A. Tato trhlina má počáteční hloubku  $h = 2$  mm. Trhliny na této bramě měly rozdílnou hloubku  $h$ . Dále trhlinu detailněji popisuje šířka  $b$  a úhel  $\alpha$ . Tyto parametry byly vybrány dle studie *Chování podélných a příčných povrchových trhlín při válcování za tepla* od autorů Esa Ervastiho a Ulfa Stahlberga. [15–16]

### 12.1.3 Měření

Další postup spočíval ve změření výšky jednotlivých rozřezaných vzorků mikrometrem. Tyto naměřené hodnoty jsem zapsal do tabulky. Jednotlivé vzorky jsem rozdělil na příčné a podélné a dále podle deformace. Poté jsem zbrousil povrch na straně trhliny, naskenoval a graficky upravil. Následně jsem graficky změřil výšku vzorků a trhlín a hodnoty jsem zapsal do tabulek. Měření výšky vzorků bylo jen orientační, abych si ověřil přesnost měření grafického. Z naměřených trhlín jsem vytvořil grafy, vyhodnotil a vyvodil závěry. Pro lepší přehlednost jsem obrázky trhlín překreslil a seřadil do tabulek.

## 12.2 Způsob posouzení trhlin

Jednotlivé vzorky jsem naskenoval na skeneru Hp photosmart, viz obr. 29. Tento skener má možnost skenovat obrázky s rozlišením až 4 800 dpi.



*Obr. 29 Skener Hp photosmart*

### 12.2.1 Měření vzorků

Jednotlivé série vzorků jsem dělil podle dvou kritérií. Jednalo se o rozdělení podle deformace bramy a dále rozdělení na vzorky s podélnými a příčnými trhlínami. Série vzorků jsem po roztřídění uložil na skenovací skleněnou plochu. Protože byly vzorky i po broušení ostré, vložil jsem mezi skenovací plochu a vzorky fólii. Tímto způsobem jsem předešel poškrábání skleněného povrchu skeneru. Vzorky se položily co nejbližší k sobě, aby zabíraly co nejméně místa na skenovací ploše, což je zachyceno na obr. 30. Poté jsem vybíral správný způsob skenování vzorku v kvalitě dpi, tzn. trhlina na vzorku byla v co nejvyšší kvalitě viditelnosti a přibližitelnosti. Kdybych vybíral největší rozlišení při velikosti obrázku, mám na mysli skutečnou velikost vzorku, naskenovaný obrázek při maximálním rozlišení 4 800 dpi by byl tak velký, že by se s ním nedalo dále pracovat a manipulovat. Naopak při menším rozlišení by se nedala přiblížit trhlina natolik, aby byla viditelná. Zvolil jsem proto optimální hodnotu rozlišení 2 400 dpi. Aby byl obraz detailně kontrastně znázorněn, zvolil jsem barevné skenování s miliony barev.

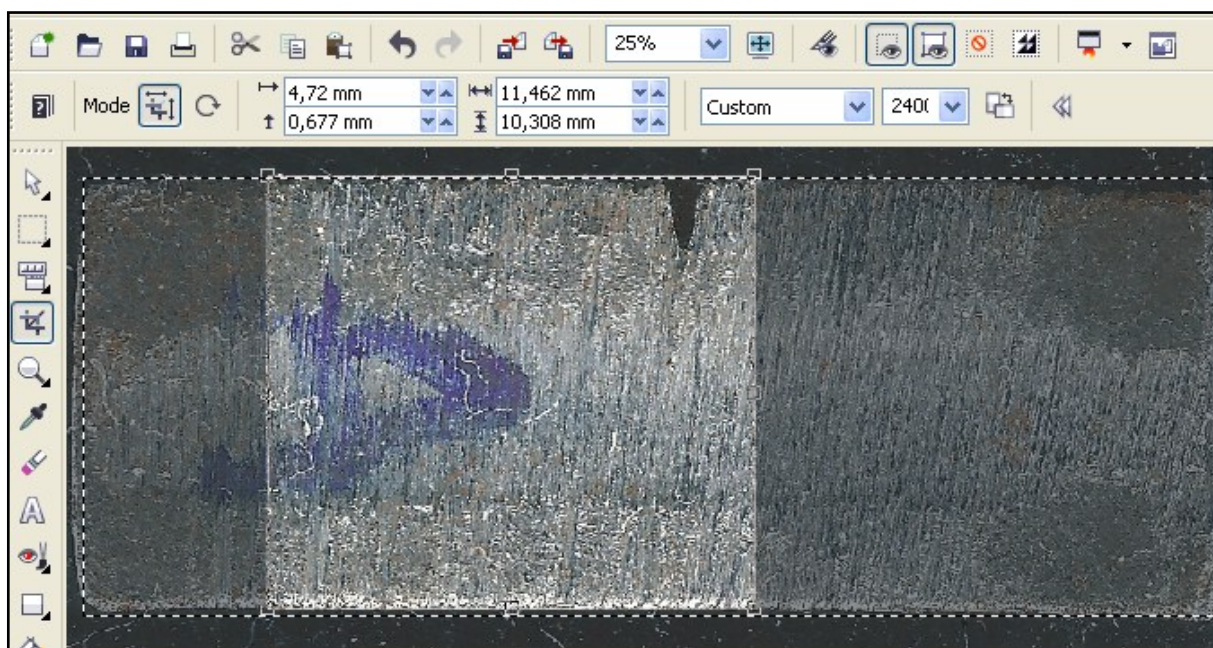


*Obr. 30 Série příčně válcovaných vzorků*



### 12.2.2 Měření výšky vzorků

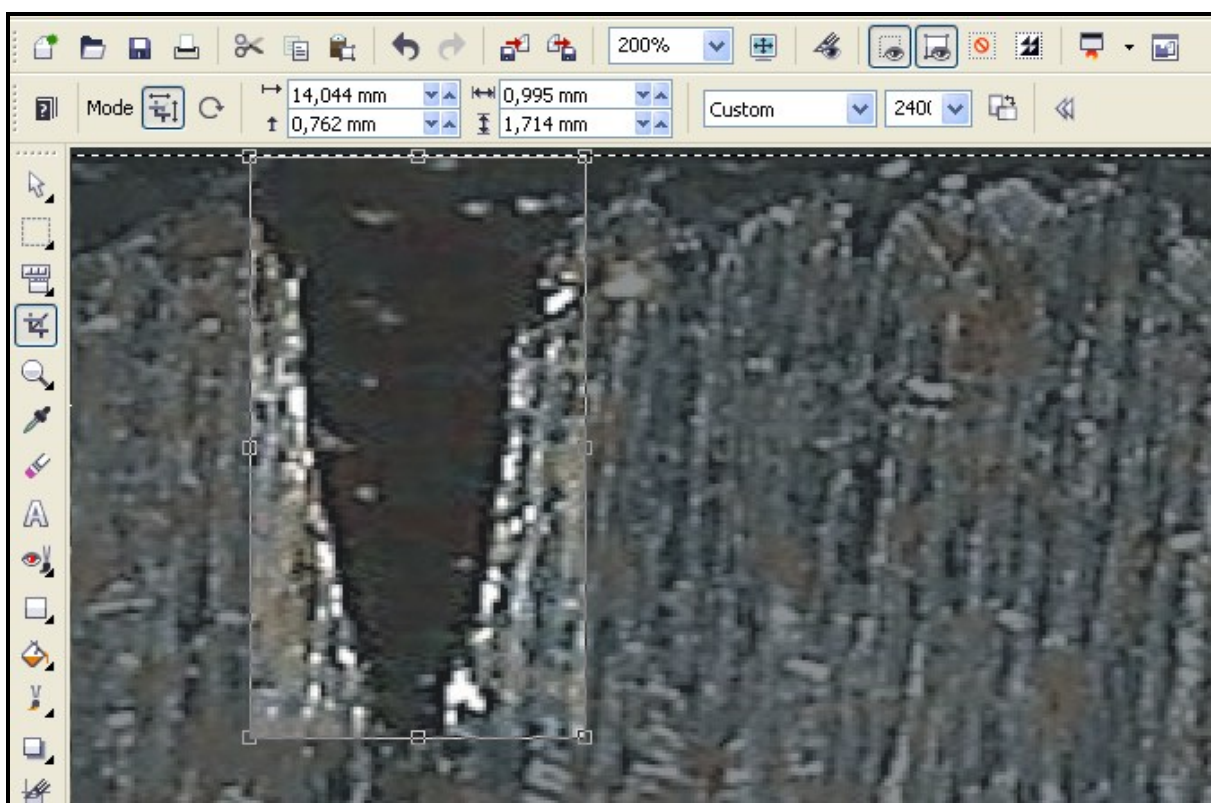
Naskenované vzorky z obr. 31 jsem v programu Corel Photo-Paint X4 ořezal na jednotlivé vzorky a otočil o sto osmdesát stupňů. Poté jsem začal měřit výšku vzorků, viz obr. 28. Vynesl jsem si obdélník, který přesně kopíroval výšku vzorku, až potom jsem pomocí funkce měření výšku změřil. Na obrázku lze vidět měření výšky. Program přepočítával přesně velikost naměřené hodnoty na obrázku do skutečné velikosti. Tuto naměřenou výšku jsem porovnával s měřením výšky mikrometru. Došel jsem k závěru, že výška naměřená mikrometrem se lišila v některých případech pouze o setiny milimetru. Tím se potvrdilo, že měření skutečným měřítkem v programu je podobné, jako bychom měřili s pomocí mikrometru.



**Obr. 31** Měření výšky vzorku

### 12.2.3 Měření trhlin

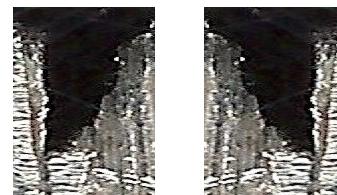
Další postup spočíval v digitálním přiblížení (zoom) oblasti vzorku, kde se nachází trhlina, na 200%. Posoudil jsem, kde je začátek a konec trhliny. Tuto část jsem si označil obdélníkem a poté jsem pomocí funkcí v programu změřil výšku a šířku trhliny. Na obr. 32 lze vidět označení počáteční délky celého vzorku. Od této horizontální přímky jsem posuzoval výšku trhliny. Jenom tento ořezaný samostatný vzorek zabírá 8 MB v plné kompresi (zabalení) formátu jpg. Tento obrázek je možné v jakémkoliv místě digitálně přiblížit ještě o 1 600% až po samostatné pixely.



*Obr. 32 Měření výšky trhliny*

#### 12.2.4 Směr válcování trhlin

Stejným způsobem jsem postupoval u příčných trhlin. Protože po rozřezání byla použita levá nebo pravá část vzorku v závislosti na viditelnosti trhliny, musely se vzorky znovu poskládat a označit, ze kterého směru byly po vyválnování naskenovány. Poté se použila funkce zrcadlení v programu Corel Photo-Paint X4. Tento postup je zachycen na obr. 33. Všechny vzorky trhlin jsem seřadil ve směru válcování zleva doprava.



**Obr. 33** Trhlina válcovaná zleva doprava a zrcadlená

#### 12.2.5 Měření úhlu trhliny

Veškeré trhliny byly přiblíženy stokrát a uloženy do tabulky. Dále jsem vzorky vytiskl na papír a ponechal místo pro změření úhlu. Všechny úhly jsem měřil pomocí úhloměru.

### 13. Analýza výsledků

Pro analýzu výsledků jsem zvolil program Microsoft Office Excel. Nejdříve jsem si vytvořil tabulku hodnot, kde jsem zapsal naměřené hodnoty, viz tab. 4–11. Jedná se o výšku měřenou mikrometrem, výšku vzorku, výšku trhliny, šířku trhliny v grafickém programu a její úhel měřený úhloměrem v tab. 4–11. Vytvořil jsem následně grafy a posoudil chování trhlin. Seřazené obrázky trhlin jsem porovnal a stanovil závěry.

## 13.1 Tabulky naměřených hodnot

### 13.1.1 Tabulky podélných trhlin

A, C, F, H – umístění vzorku na bradě a výchozí výška trhliny v mm

$H_S$  – výška vzorku měřená mikrometrem

$H_M$  – výška vzorku měřená grafickým programem

$h$  – výška trhliny

$b$  – šířka trhliny

$\alpha$  – úhel trhliny

$(h*b)/2$  – přibližný obsah trhliny

**Tabulka 4** Vlastnosti podélné trhliny A

A (2 mm)	$H_S$	$H_M$	$h$	$b$	$\alpha$	$(h*b)/2$
1	10,326	10,309	1,577	0,91	29	0,717535
2	10,319	10,298	1,365	1,069	43	0,729593
3	10,059	9,917	0,773	0,815	61	0,314998
4	9,426	9,44	1,11	0,976	42	0,54168
5	9,123	9,149	0,878	0,836	58	0,367004
6	8,854	8,943	1,101	1,005	46	0,553253
7	8,693	8,699	0,603	0,582	60	0,175473
8	8,19	8,213	0,54	0,746	není	0,20142
9	8,064	7,99	0,603	0,836	70	0,252054
10	7,632	7,705	0,413	0,434	72	0,089621

**Tabulka 5** Vlastnosti podélné trhliny C

C (2 mm)	$H_S$	$H_M$	$h$	$b$	$\alpha$	$(h*b)/2$
1	10,538	10,499	0,836	1,037	62	0,433466
2	10,216	10,228	1,365	1,037	37	0,707753
3	9,996	9,966	1,397	0,942	37	0,657987
4	9,426	9,414	1,206	1,069	48	0,644607
5	9,388	9,308	0,963	0,921	47	0,443462
6	9,058	8,985	0,995	0,984	48	0,48954
7	8,698	8,668	0,942	0,91	51	0,42861
8	8,342	8,276	0,497	0,677	54	0,168235
9	7,959	7,915	0,582	0,889	72	0,258699
10	7,676	7,763	0,466	0,593	81	0,138169

**Tabulka 6** Vlastnosti podélné trhliny *F*

F (1 mm)	H <sub>S</sub>	H <sub>M</sub>	h	b	α	(h*b)/2
1	10,75	10,736	0,741	0,624	44	0,231192
2	10,355	10,302	0,688	0,656	52	0,225664
3	10,027	10,109	0,698	0,571	42	0,199279
4	9,717	9,663	0,709	0,635	45	0,225108
5	9,235	9,217	0,582	0,571	44	0,166161
6	9,44	9,356	0,624	0,529	44	0,165048
7	8,981	8,955	0,55	0,519		0,142725
8	8,384	8,371	0,571	0,646	55	0,184433
9	8,04	7,996	0,455	0,508	63	0,11557
10	7,666	7,695	0,424	0,519	68	0,110028

**Tabulka 7** Vlastnosti podélné trhliny *H*

H (1 mm)	H <sub>S</sub>	H <sub>M</sub>	h	b	α	(h*b)/2
1	10,374	10,358	0,698	0,73	68	0,25477
2	10,38	10,323	0,624	0,656	42	0,204672
3	10,1	9,948	0,603	0,656	55	0,197784
4	9,753	9,726	0,476	0,603	55	0,143514
5	9,055	8,996	0,169	0,307	Není	0,025942
6	8,8	8,953	0,349	0,243	Není	0,042404
7	8,526	8,562	0,413	0,201	Není	0,041507
8	8,407	8,329	0,413	0,127	Není	0,026226
9	Není	8	0,312	0,157	Není	0,024492
10	7,679	7,758	0,169	0,265	59	0,022393

### 13.1.2 Tabulky příčných trhlin

B, D, E, G – umístění vzorku na bradě a výchozí výška trhliny v mm

$H_S$  – výška vzorku měřená mikrometrem

$H_M$  – výška vzorku měřená grafickým programem

$h$  – výška trhliny

$b$  – šířka trhliny

$\alpha$  – úhel trhliny

$(h*b)/2$  – přibližný obsah trhliny

**Tabulka 8** Vlastnosti příčné trhliny B

B (0,5 mm)	$H_S$	$H_M$	$h$	$b$	$\alpha$	$(h*b)/2$
1	10,411	10,403	0,497	0,836	80	0,207746
2	10,108	10,033	0,376	0,529	není	0,078292
3	9,951	9,906	0,392	0,709	72	0,138964
4	9,543	9,398	0,522	0,815	69	0,237165
5	9,299	8,858	0,433	0,868	85	0,179242
6	9,023	8,689	0,474	0,877	78	0,146909
7	8,73	8,226	0,371	0,856	72	0,121688
8	8,276	7,705	0,465	0,868	95	0,11501
9	8,019	7,377	0,307	0,72	není	0,11052
10	7,639	8,033	0,290	0,794	79	0,07543

**Tabulka 9** Vlastnosti příčné trhliny D

D (1 mm)	$H_S$	$H_M$	$h$	$b$	$\alpha$	$(h*b)/2$
1	10,683	10,435	1,101	0,992	86	0,716751
2	10,205	10,096	0,847	1,069	76	0,452722
3	9,831	9,832	0,73	0,889	58	0,324485
4	9,706	9,382	0,773	1,111	62	0,429402
5	9,417	9,123	0,54	0,91	80	0,2457
6	9,029	8,636	0,571	0,788	73	0,196424
7	8,722	8,226	0,402	0,771	83	0,114771
8	8,343	7,631	0,402	0,751	87	0,150951
9	8,011	7,355	0,434	0,624	65	0,135408
10	7,653	7,8	0,349	0,825	100	0,143963

**Tabulka 10** Vlastnosti příčné trhliny E

E (1,5mm)	H <sub>S</sub>	H <sub>M</sub>	h	b	$\alpha$	(h*b)/2
1	10,55	10,541	1,302	1,408	54	0,916608
2	10,24	10,118	1,333	1,27	52	0,846455
3	9,907	9,451	1,249	1,152	60	0,594524
4	9,703	9,44	1,154	1,143	47	0,659511
5	9,26	8,371	0,963	1,154	57	0,555651
6	9,047	8,572	0,677	1,261	70	0,189899
7	8,717	8,223	0,677	1,287	70	0,16485
8	8,363	7,779	1,069	1,132	55	0,605054
9	8,05	7,186	0,586	1,22	109	0,17446
10	7,656	7,652	0,571	0,952	89	0,271796

**Tabulka 11** Vlastnosti příčné trhliny G

G(2 mm)	H <sub>S</sub>	H <sub>M</sub>	h	b	$\alpha$	(h*b)/2
1	10,687	10,615	1,704	1,46	46	1,24392
2	10,285	9,917	1,535	1,386	40	1,063755
3	10,009	9,641	1,409	1,45	48	1,166525
4	9,704	9,366	1,302	1,032	45	0,671832
5	9,374	8,287	1,344	1,365	56	0,91728
6	8,629	8,181	1,016	1,058	51	0,537464
7	8,722	8,226	1,002	1,016	58	0,114771
8	8,316	7,673	1,228	0,875	44,5	0,53725
9	7,689	7,218	0,836	0,741	58	0,309738
10	7,657	7,133	0,817	0,963	63	0,585986

## 13.2 Grafické posouzení

Nejprve jsem trhliny hodnotil z hlediska přehlednosti, poté jsem je hodnotil z hlediska ohýbání následným tlakem válců. Dalším kritériem bylo hodnocení trhliny z hlediska šíření do materiálu, způsoby válcování trhliny stylem V nebo Y. V poslední fázi jsem hodnotil chování trhliny z hlediska deformace. Skutečné obrázky trhlín jsou k nahlédnutí v příloze.



### 13.2.1 Grafické posouzení podélné trhliny

Podle vzorků na obr. 34 soudím, že u podélné trhliny A a C s počáteční výškou 2 mm lze podrobněji popsat průběh chování trhliny.

Od obrázků 3 A, 4 A a 4 C, tzn. s deformací od 20,5 procent, jde vidět na spodní části trhliny, jak se ohýbá do strany. Obzvláště trhliny C a F, což si vysvětlují polohou trhlín, které jsou situovány na okrajích bramy.

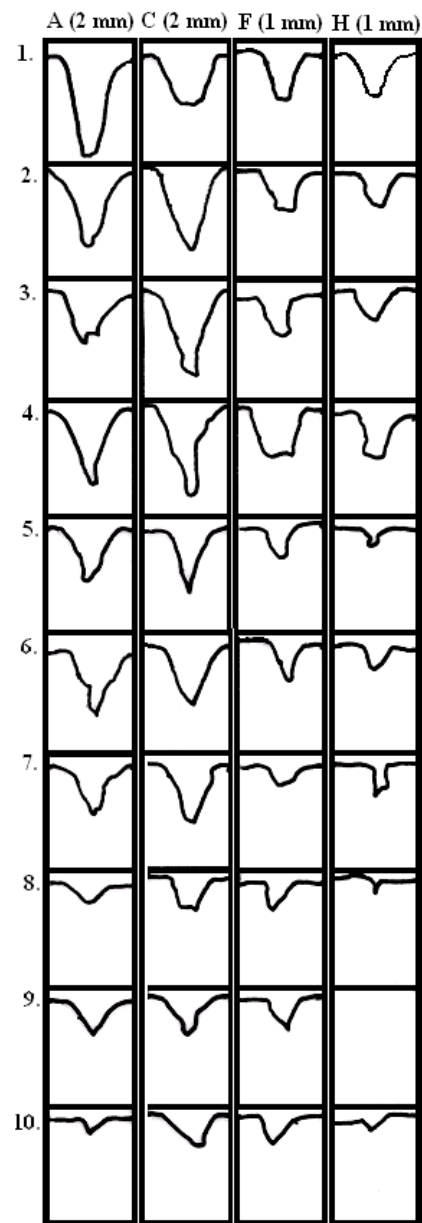
Podle mého názoru se trhliny na konci bramy chovaly nepřizpůsobivěji pro jejich následnou eliminaci než uprostřed.

Na podélných trhlínách je patrné, že se šíří dál do materiálu při všech možných deformacích.

Podélné trhliny mají tendenci se uzavírat způsobem písmene Y. Nejlépe to lze vypořádat od obrázku 8, tj. od deformace 40%.

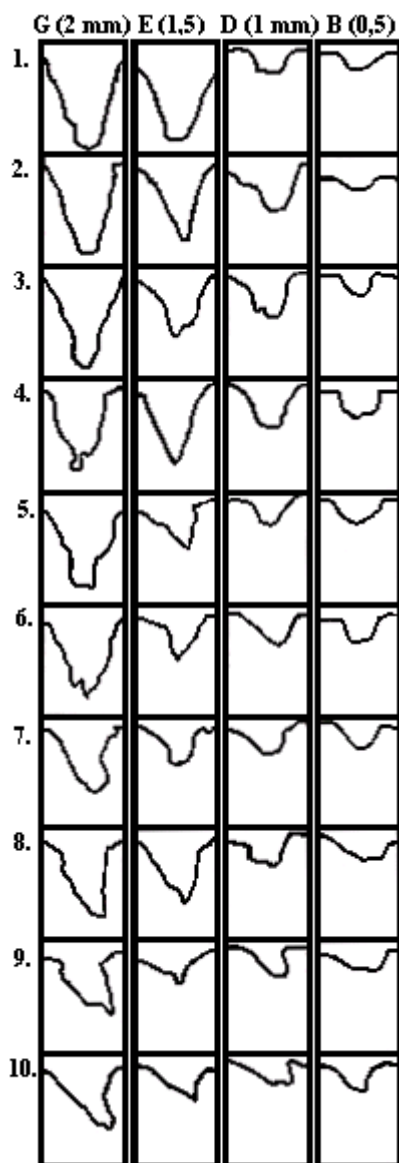
Trhliny 7 A, 7 C, 9 A a 9 C se roztahují tak, že horní úhel je alespoň dvakrát větší, než úhel spodní, jak je popsáno v článku *Chování podélných a příčných povrchových trhlín při válcování za tepla*. Na obrázku 8 A, 8 C a 10 A je patrné, že se trhlina zaválcovává a je těžké odhadnout, zda je uvnitř zoxidována či nikoliv. Na obrázcích ve sloupci C jde vidět mírná změna chování trhlín.

Podle obrázku soudím, že při deformacích do 25%, viz obr. 1–5, by se tyto trhliny měly vyválcovat snadněji, ale i tak je zde velká pravděpodobnost, že bude zaválcován zoxidovaný povrch trhliny.



Obr. 34 Podélné trhliny A, C, F, H

### 13.2.2 Grafické posouzení příčné trhliny



Obr. 35 Příčné trhliny G, E, D, B

Na těchto trhlínách obr. 35 lze dobře rozpoznat směr válcování trhlín, který probíhal zleva doprava. V tomto případě je dobře viditelná i trhlina s počáteční výškou 0,5 mm.

Při vyšších deformacích lze rozpoznat na vzorku 9 a 10, že se trhlina posouvá jedním směrem do strany. Toto je nepříznivé chování trhliny, protože následným válcováním stejného smyslu by mohlo dojít k zaválcování zoxidovaného povrchu. Pokud bychom válcovali v opačném směru, trhlina by se měla narovnat zpět do tvaru V a otevřít se zcela bez vedlejších následků.

Při vyšších deformacích, od vzorku 5 E, se už trhliny otevírají. Podle tvaru trhliny vzorku 8 E usuzují, že se trhlina začala šířit do materiálu. To je velmi nežádoucí stav. Trhliny ve sloupci B (0,5 mm) se chovají příznivě. Lze tak usoudit podle změny výšky a šířky. Při válcování se jejich výška částečně zmenšuje a jejich šířka se naopak zvětšuje. Evidentně tomu tak je u vzorků 5–7–9. Tato trhlina by se měla zcela otevřít při druhém válcování se stejnou deformací, ale opačným směrem válcování. Trhliny D (1 mm) vyznačují podobné chování jako trhliny B. U trhlín E dochází k velkému zmenšení výšky h při velkém rozšíření.

Toto je ideální stav. Trhliny s deformací němění příliš svou

výšku jenom se posouvají do stran ve směru válcování, viz obrazek G.

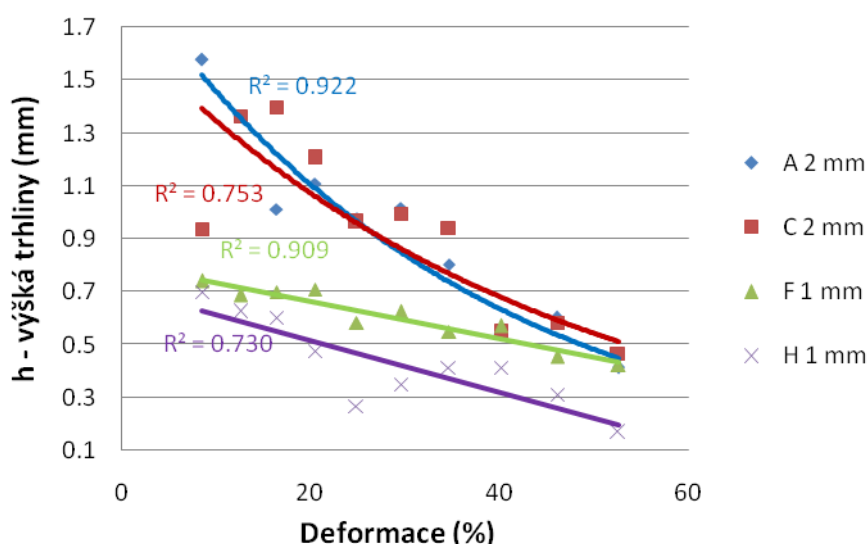
Podle mého názoru se příčné trhliny chovají příznivě pro jejich následnou eliminaci.

### 13.3 Grafy závislosti výšky, šířky a obsahu na deformaci

Na osu x jsem vynesl deformaci. Toto řešení se mi zdá výhodnější z důvodu lepší přehlednosti. Při každé deformaci se zmenší výška vzorku. Z toho vyplývá, že deformace je úměrná výšce vzorku. Na ose y jsem vynášel výšku a šířku trhliny. Dále jsem udělal graf v závislosti na přibližné ploše, kterou trhliny zabírají, použil jsem výpočet pro obsah rovnostranného trojúhelníku. Tyto hodnoty sice nejsou přesné, protože trhliny se posouvají do stran, ale pro zohlednění trhliny, co se jejího celkového obsahu týče, je podle mého názoru tento vzorec dostačující. Body v grafech jsem proložil spojnici trendu, a to buď lineární nebo exponenciální podle hodnoty koeficientu korelace R.

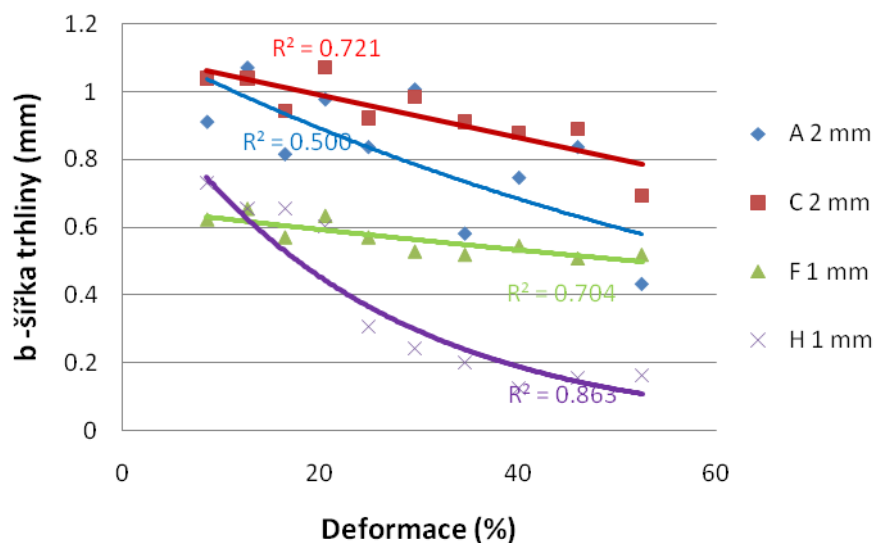
Úhel byl u některých trhlin naprosto neměřitelný a nepřesný, proto jsem tyto grafy nevytvářel.

#### 13.3.1 Grafy – podélné trhliny



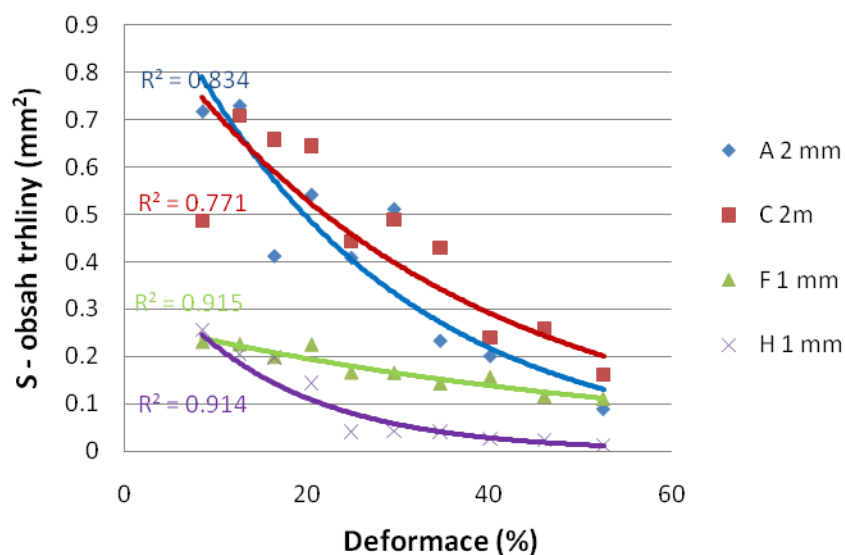
**Obr. 36** Závislost podélných trhlin na deformaci

Z grafu na obr. 36 lze pozorovat, že po největší deformaci, tj. 50 %, se výška trhlin zmenšila na 0,4 mm. Trhliny A-C s počáteční výškou 2 mm s deformací svou výšku výrazně zmenšují. Pouze vzorek H má na konci měření výšku 0,1 mm. Nepřesnost si vysvětlují pozicí trhliny, která byla na konci bramy.



**Obr. 37** Závislost šířky podélných trhlin na deformaci

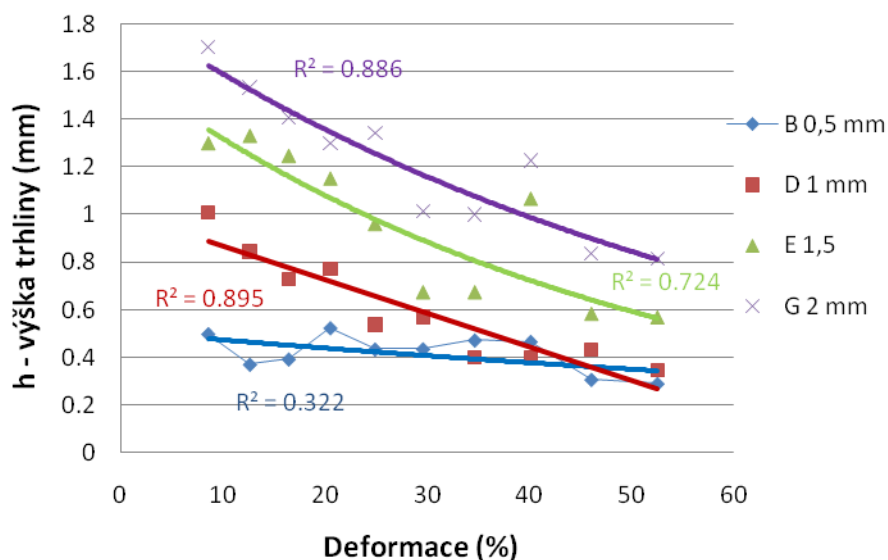
Na grafu z obr. 37 lze vidět Trhliny při největší deformaci, tj. 50%, mají šířku 0,4–0,6 mm. Pouze vzorek H má šířku 0,2 mm. I zde si nepřesnost vysvětlují pozicí trhliny, která byla na konci bramy.



**Obr. 38** Závislost obsahu podélných trhlin na deformaci

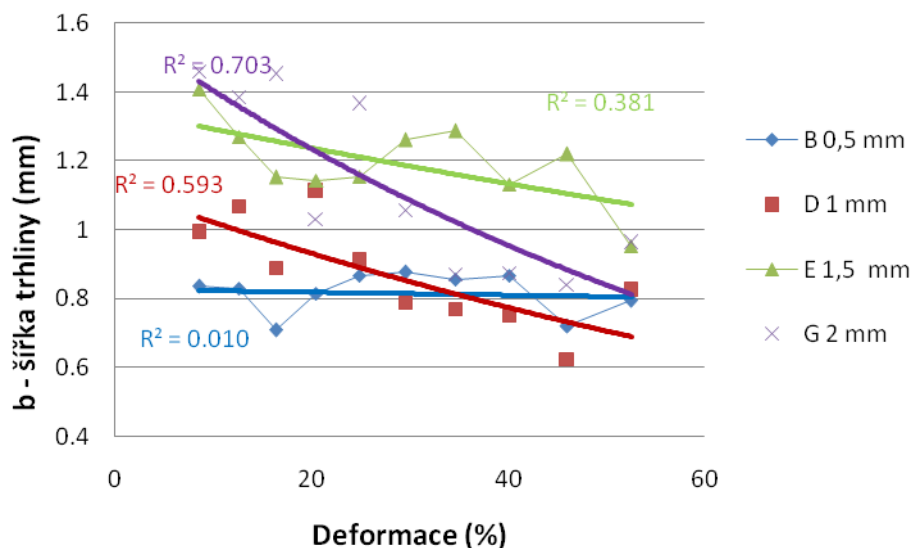
Na grafu z obr. 38 vidíme postupné zmenšování obsahu trhlin všech vzorků až po hodnotu 0,1 mm. Z grafu můžeme usoudit, že trhliny s větší počáteční výškou 2 mm tzn. A-C účinněji zmenšují svůj obsah se vzrůstající deformací.

### 13.3.2 Grafy – příčné trhliny



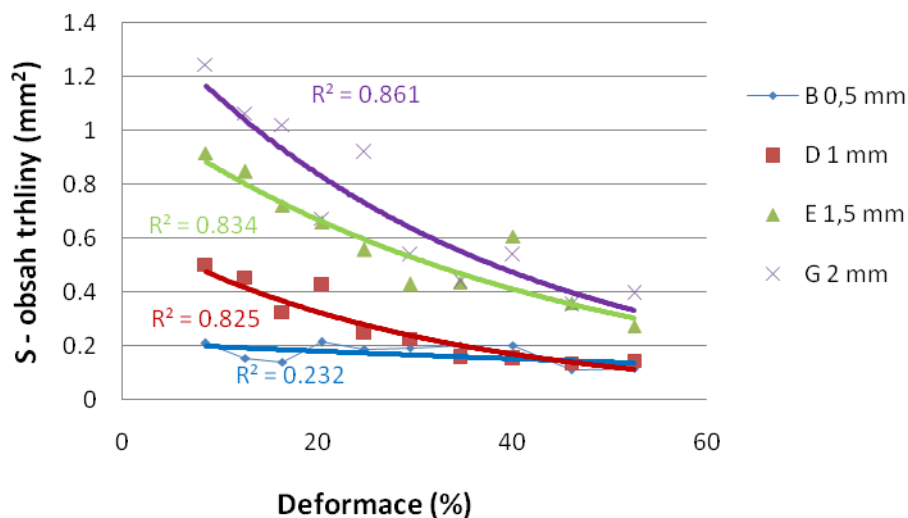
Obr. 39 Závislost výšky příčné trhliny na deformaci

Z grafu, který je na obr. 39, lze vidět, že trhliny svoji výšku s deformací zmenšují. Je zřejmé, že trhliny s menší počáteční výškou B 0,5 se příliš nezmenšují s rostoucí deformací.



Obr. 40 Závislost šířky příčné trhliny na deformaci

Z grafu na obr. 40 lze vypořadovat, že všechny trhliny mají při konečné deformaci přibližnou šířku 0,7–0,9 mm. křivky B a E v závislosti na deformaci neklesají, to znamená, že válcování těchto příčných trhlin nemá na šířku velký vliv. K razantnějšímu zúžení trhliny došlo jen u trhlín D a G s větší počáteční výškou.



Obr. 41 Závislost obsahu příčné trhliny na deformaci

Na grafu z obr. 41 lze vidět, že se obsah trhlín se vzrůstající deformací zmenšuje od 0,1 až do 0,3 mm<sup>2</sup>. Podle vzorků B by se dalo usoudit, že se obsah trhliny s menší počáteční výškou příliš nezmenšuje s rostoucí deformací.

## 14. Diskuze

V této části budu formou diskuze prezentovat výsledky realizovaného výzkumu, *Analýzy chování povrchových trhlín při válcování za tepla*, týkajícího se problematiky povrchových trhlín na kontilitých bramách.

Použil jsem deset bram, na kterých byly vytvořeny vruby simulující trhliny kontilitých bram. Tyto bramy jsem válcovál rozdílnou deformací tak, abych napodobil matematickou simulaci od autorů Esa Ervastiho a Ulfa Stahlberga. Válcování samotných bram nebylo časově náročné. Poté jsem tyto bramy rozřezal na kousky tak, aby trhlina byla situovaná ve středu vzorku. Horší bylo řezání samostatných vzorků, protože na každé bramě jsem musel provést minimálně osm řezů a ne vždy měl konečný vzorek dostatečnou délku na to, aby se dal pevně upnout do sklíčidel pásové pily a uřezat zcela rovně. Dále jsem naskenoval plochy trhlín, což nebylo tak časově náročné jako volit správný postup a hledat co nejlepší řešení problému viditelnosti trhliny. Přesto si myslím, že tento způsob je časově výhodnější než zobrazovat obrázky trhliny pomocí metalografického výbrusu. Dále jsem změřil hloubku a šířku těchto

trhlin, vyhodnotil v tabulkách a v grafech porovnal jejich chování. Z těchto výsledků jsem došel k následujícím zjištěním.

## 14.1 Praktické problémy

Praktické problémy jako geometrie jednotlivých trhlin, tzn. uměle vytvořený vrub, nelze ztotožnit s trhlinou vzniklou při výrobním procesu. Tyto vady vznikají náhodně na materiálu a rozhodně nemají vždy uhel 30 stupňů.

Na naskenovaných obrázcích trhlin lze spatřit, že povrch není dokonale vybroušen, přesto je toto řešení dostačující pro změření výšky, šířky a posouzení tvaru trhliny. Tato práce zanedbává skutečnost, že trhlina se nešíří pouze v rovině provedeného řezu, ale i jinými směry. Při měření jsem měl naskenovaný jenom povrch vzorku, a proto nebylo možné přesně určovat, zda se jedná o začátek trhliny. U každého vzorku jsem musel posuzovat, kde trhlina začíná. Nebylo zcela zřejmé, zda se trhlina dále šíří do materiálu. I přesto se stín trhliny ukázal jako dostatečně přesný. Ve vyhodnocení grafu jsem volil proložení spojnicí trendu, mnohdy mi u těchto spojnic vyšla velká nepřesnost, a proto jsem tyto body musel proložit přímkami.

## 14.2 Chování trhlin

Ideální způsob chování trhliny při válcování za tepla by měl probíhat tak, aby se šířka trhliny rovnoměrně s deformací zvětšovala a výška se úměrně s deformací zmenšovala. To znamená, že trhlina má počáteční tvar V, následnou deformací se boční strany posunují do stran až do roviny povrchu. To znamená, že spodní část trhliny by stoupala na povrch a trhlina by se zcela otevřela. Naopak nevhodný způsob je, když má trhlina po deformaci tvar písmene Y, to znamená, že spodní část trhliny se od spodu svažuje až k povrchu, zde dojde k zavření zoxidovaného povrchu trhliny. Nemohl jsem přehlédnout, že trhlina válcovaná takto nevhodným způsobem se velmi rychle při vysokých deformacích zaválcovávaly a ani na vzorcích v řezu pod trhlinou nebyly viditelné náznaky oxidace materiálu. Proto si myslím, že by bylo vhodné, tento povrch v řezu podrobit metalografické zkoušce a dále by měl být podroben tento způsob dalšímu zkoumání válcování trhlin.

### 14.3 Podélné trhliny

Na těchto trhlínách jsem zjistil, že s deformací od 20,5% se ohýbají do strany. Obzvláště trhliny, které byly situovány na okrajích bramy, což si vysvětluji jiným tokem kovu, který není ovlivněn tuhými konci. Lze také rozpoznat, že se trhliny ani při velkých deformacích nešíří dál do materiálu. Z naměřených výsledků jsem vypožoroval, že hloubka trhliny nehraje až tak velkou roli při jakékoliv deformaci. S velikostí deformace se výška trhliny zmenšuje téměř lineárně. Válcováním velkými deformacemi se sice nezvětšuje šířka tak, jak je žádoucí, ale ani se příliš nezmenšuje, velikost deformace nemá velký vliv na šířku trhliny. Dalo by se tvrdit, že při menších hloubkách trhlín a při menších deformacích zůstává šířka téměř konstantní. Z těchto tvrzení vyplývá, že trhlínu nebude možno vyválcovat. Naopak je zde možnost trhlínu zavalcovat při deformacích nad 24% tak, že se od spodní strany bude trhlina svařovat směrem k povrchu, v tomto případě je zde riziko zavalcování zoxidovaného povrchu. Z naměřených výsledků tvrdím, že je výhodné podélné trhliny válcovat poměrně menšími deformacemi do 16%.

### 14.4 Příčné trhliny

Trhliny se ohýbají do stran, toto je logické z hlediska geometrie válcování. Při velkých deformacích nad 40% se spodní část trhliny šíří do boční strany materiálu. Toto je nepříznivé chování trhliny, protože následným válcováním stejného směru by, podle mého názoru, mohlo dojít k zavalcování zoxidovaného povrchu trhliny. Pokud bychom válcovali v opačném směru, trhlina by se měla narovnat zpět do tvaru V a vyválcovat se zcela bez vedlejších následků.

Při vyšších deformacích od 20% se už trhliny otevírají, ale také mohu tvrdit, že se dále šíří do materiálu. V podstatě se při válcování veškerými deformacemi trhliny chovají správně, bohužel se opět šíří do materiálu. Toto je velice nepříznivý stav. Zvětšuje se šířka trhliny tak, jak je žádoucí, ovšem výška trhliny zůstává poměrně stejná a deformace má na ni malý vliv. Příčné trhliny se často nevyskytují na kontilitých bramách příliš hluboko v materiálu, přesto navrhuji, aby se hluboké příčné trhliny válcovaly malými deformacemi do 20% tak, aby se zvětšila šířka trhliny a nešířily se dál do materiálu, pokud se jedná o trhliny menší hloubky. Tam bych volil velké deformace až 40%.



## 14.5 Technologie válcování

Pokud bychom válcovali plechy a umožňovalo by nám válcovací zařízení pootočit předvalek o  $90^\circ$ , volil bych takový způsob válcování předvalku, aby největší trhliny byly orientovány podélně. Dále je třeba válcovat s deformací 16–25% a nakonec s deformací nad 35%. V tu chvíli by měl být eliminován nežádoucí efekt hlubokých příčných trhlin. V tomto případě podélné trhliny, které by byly vyválcovány příčně, by omezily svou výšku a částečně by se rozšířily. Poté můžeme válcovat tak, jak technologie dovoluje.

Válcování pásu – v tomto případě je nemožné pootočit předvalek o  $90^\circ$  a je třeba eliminovat hluboké příčné trhliny vratným válcováním s deformací 16–25%. Je zde možnost, že by se trhlinka měla rozšířit, aniž by se dále šířila. Co se týče podélných trhlin, můžeme válcovat natolik, jak nám technologie dovolí. Není zde ale možnost trhliny vyválcovat.

## 14.6 Porovnání s matematickými modely

Pro porovnání chování povrchových trhlin s matematickou simulací, jsem se snažil při válcování vytvořit podobné podmínky. U některých trhlin lze vidět podobnost se simulací. V jiných případech, lze poznat velké odlišnosti se skutečnými vzorky. Docházím tedy k závěru, že simulace není zcela přesná. Jejich konečno prvková síť v okolí trhliny je příliš hrubá a tím je velmi zkresleno chování trhlin při válcování. Takové zesílení o pěti uzlech, popisující model trhliny neurčuje přesně, obzvláště u podélných trhlin, zda se trhlinka zcela otevře nebo se zcela uzavře. Spodní dva uzly se podle matematického modelu vždy spojí, a tak dávají představu, že trhlinka se při jakékoliv deformaci zaválcovává způsobem Y tvaru trhliny. Ve výsledcích mé práce jsou složitější tvary, které matematická simulace nebude moci napodobit, pokud nebude použit větší počet uzlů trhliny, tzn. hustější konečno prvková síť.

## 15. Závěr

V laboratoři kování a válcování Katedry tváření materiálu jsem se pokoušel napodobit matematické modely od autorů Esa Ervastiho a Ulfa Stahlberga pomocí laboratorního válcování, poté jsem analyzoval chování povrchových trhlin při válcování za tepla.

Použil jsem deset ocelových bram s uměle vytvořenými vruby simulující trhliny, které jsem následně válcováním s každou jinou deformací. Vyhodnotil jsem vzorky a ze získaných výsledků jsem došel k následujícím závěrům.

Geometrie jednotlivých trhlin, tzn. uměle vytvořený vrub, nelze ztotožnit s trhlinou vzniklou při výrobním procesu, protože vady vznikají náhodně na materiálu. Z hlediska deformace vruby popisují chování trhlin během válcování.

V průběhu měření výšky a šířky vzorku jsem naskenoval jenom povrch vzorku, a proto nebylo možné přesně určovat, zda se jedná o začátek trhliny, nebo pouze o nerovnoměrný povrch. V tomto měření došlo k nepřesnostem, které zkreslily výsledky grafů.

Jsem přesvědčen, že způsob skenování vzorků trhliny je vhodný pro popis chování trhliny, v případě pozorování jejího tvaru. Tato metoda je velice výhodná právě proto, že je schopna vyhodnotit větší množství vzorků najednou a tím značně šetří vynaložený čas.

Z výsledků je patrné, že podélné a příčné trhliny by měly být válcovány deformacemi do 20%, aby se alespoň částečně eliminoval negativní dopad, který tyto vady způsobují.

Ideální způsob chování trhliny při válcování za tepla by měl probíhat tak, aby se šířka trhliny rovnoměrně s deformací zvětšovala a výška se úměrně s deformací zmenšovala. To znamená, že trhlina má počáteční tvar V, následnou deformací se boční strany posunují do stran, až se spodní část trhliny stane povrchem materiálu.

Docházím k závěru, že pro detailnější *analýzu chování podélných a příčných povrchových trhlin při válcování za tepla* by bylo vhodnější použít více bram, které se postupně válcují v jednom směru a také postupně válcují ve zpětném směru. Dále bych porovnal tyto výsledky a podrobil metalografickým zkouškám v řezu trhliny. Tento způsob určí, zda se u podélných trhlin zaválcuje zoxidovaný povrch do materiálu a u příčných trhlin popíše šíření do materiálu. Taková analýza by měla většího významu pro válcování pásů.

Doufám, že tato práce bude přínosem a bude sloužit jako jeden z podnětů dalšího zpracování problematiky analyzování povrchových vad při válcování za tepla, alespoň z části popsala a pomohla objasnit chování povrchových vad na kontilitých bramách.












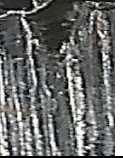












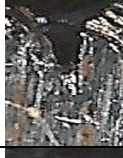














## Seznam použité literatury:

- [1] ŽÍDEK, Milan ; KUŘE, František . *Válcování. Ostrava : Vysoká škola báňská Ostrava, 1986. 379 s.*
- [2] *Pilsen STEEL : Ingoty* [online]. 05. 08. 2010 [cit. 2010-08-09]. Pilsen STEEL s.r.o. Dostupné z WWW: <<http://www.pilsensteel.cz/cs/ingoty/>>.
- [3] ŠTĚTINA, Josef. *Dynamický model teplotního pole plynule odlévané bramy* [online]. [s.l.], 2007. 104 s. Dizertační práce. Vysoká škola báňská -Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Prof. Ing. František Kavička, CSc. Dostupné z WWW: <<http://ottp.fme.vutbr.cz/users/stetina/disertace/index.htm>>.
- [4] GINZBURG, V. B. *Steel-rolling technology: theory and practice. New York : Marcel Dekker, 1989. ISBN 0-8247-8124-4.*
- [5] ING. FRYDRÝŠEK, Karel. *Řešení problematiky nestacionární, cyklické, tepelné a elastoplastické napjatosti v krystalizátoru pro plynulé odlévání* [online]. Vysoká škola báňská Ostrava, 2009. 30 s. Habilitační práce. VŠB-TU Ostrava. Dostupné z WWW: <<http://www.339.vsb.cz/..%5CPDF%5Chabilita%C4%8Dn%C3%AD%20p%C5%99e%20dn%C3%A1%C5%A1ka%20Frydr%C3%BD%C5%A1ek%20krystaliz%C3%A1tory%20ZPO.ppt>>.
- [6] REICHL, J.; VŠETIČKA, M. *Křivka deformace. Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 - 2010, 48, [cit. 2010-08-11]. Dostupný z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=632>>.
- [7] JELÍNEK, Petr . *Slévárenství. 5. Ostrava : VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2007. 261 s. ISBN 978-80-248-1282-3.*
- [8] GRASSO, P.-D.; DREZET, J.-M; RAPPAZ, M. Hot Tear Formation and Coalescence Observations in Organic Alloys. *TMS – The minerals, Metals and Material society : Exploring traditional, innovative, and revolutionary issues in the minerals, metals, and materials fields.* [online]. January 2002, no.1, [cit. 2010-08-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0201/Grasso/Grasso-0201.html>>.

- [9] Clean Steel. Industry Insights [online]. 21 Oct 2009, Part Two, [cit. 2010-08-10]. Dostupný z WWW: <<http://news.alibaba.com/article/detail/metalworking/100187871-1-metals-knowledge%253A-clean-steel%253A-part.html>>
- [10] PEJČOCH, Osvald. *Tváření kovů. Ostrava : Brigáda socialistické práce edičního střediska VŠB Ostrava, 1979. 432 s.*
- [11] PEJČOCH, Osvald; SOMMER, Boris ; ŽÍDEK, Milan. *Tvárenie kovov I. 2. Bratislava : Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1979. 328 s. ISBN 63-339-85.*
- [12] SCHINDLER, Ivo; *Válcování – učební text. Ostrava. VŠB TUO*
- [13] *Zdas.cz* [online]. 2006 - 2010 [cit. 2010-08-29]. ŽŽDAS a.s. Dostupné z WWW: <<http://www.zdas.cz/content.aspx?catid=94>>.
- [14] LENFELD, Petr. *Technologie 2 : Tváření kovů, Zpracování plastů* [online]. Technická univerzita Liberec : Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovu a plastů, 2008 [cit. 2010-08-29]. Tváření kovů. Dostupné z WWW: <[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/obsah\\_kovy.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/obsah_kovy.htm)>.
- [15] ERVASTI, Esa; STAHLBERG, Ulf. Transversal cracks and their behaviour in the hot rolling of steels slabs. *Journal of Materials Processing Technology*. 17. 12. 1999, 101, s. 312-321.
- [16] ERVASTI, Esa; STAHLBERG, Ulf. Behaviour of longitudinal surface cracks in the hot rolling of steel slabs. *Journal of Materials Processing Technology*. 10. 2. 1998, 94, s. 141 - 150.
- [17] SENGUPTA, Joydeep; G. THOMAS, Brian. Visualizing Hook and Oscillation Mark Formation in Continuously Cast Ultra-Low Carbon Steel Slabs. *JOM* [online]. December 2006, vol. 58, NO. 12, [cit. 2011-04-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.tms.org/pubs/journals/jom/0612/sengupta/sengupta-0612.html>>.

## Přílohy



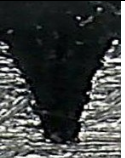

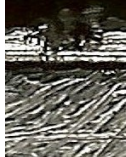



































### Obrázky podélných trhlin

	A (2 mm)	C (2 mm)	F (1 mm)	H (1 mm)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

**Obr.** Podélné trhliny A, C, F, H



## Obrázky příčných trhlin

	B (0,5 mm)	D (1 mm)	E (1,5 mm)	G (2mm)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Obr. Příčné trhliny B, D, E, G